



**Nuno Jorge dos Santos Martins Neto Mestre**

Licenciado em Engenharia Civil

## **Estudo do galgamento do quebra-mar de talude do Porto de Albufeira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Doutora Maria da Graça Reis e Silva  
de Oliveira Neves, FCT-UNL/LNEC

Coorientador: Prof. Doutor Eric Lionel Didier, FCT-  
UNL/LNEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João C. G. Rocha de Almeida

Arguente(s): Prof. Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil

Vogal(ais): Prof<sup>ª</sup>. Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Maio de 2015**





**Nuno Jorge dos Santos Martins Neto Mestre**

Licenciado em Engenharia Civil

## **Estudo do galgamento do quebra-mar de talude do Porto de Albufeira**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Doutora Maria da Graça Reis e Silva  
de Oliveira Neves, FCT-UNL/LNEC

Coorientador: Prof. Doutor Eric Lionel Didier, FCT-  
UNL/LNEC

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João C. G. R. Almeida

Arguente(s): Prof. Doutor Luís Miguel Chagas Costa Gil

Vogal(ais): Prof<sup>ª</sup>. Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Maio de 2015**





*“Copyright”* Nuno Jorge dos Santos Martins Neto Mestre, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# AGRADECIMENTOS

---

Esta dissertação assinala o fim de uma difícil mas importante etapa da minha vida, não podendo acabar sem expressar o meu sentido agradecimento a todos aqueles que, direta ou indiretamente, ao longo dos últimos anos, me ajudaram a alcançar mais uma meta.

À Professora Maria da Graça Neves, minha orientadora, um especial agradecimento pela paciência e disponibilidade, pela força e colaboração que ofereceu e, acima de tudo, pelos conhecimentos transmitidos, foram imprescindíveis à realização desta dissertação.

Ao Professor Eric Lionel Didier, meu coorientador, agradeço a sua preciosa colaboração e ajuda, dada em momentos difíceis e que foram sempre importantes na resolução de alguns problemas.

Gostaria ainda de agradecer a oportunidade de realização do estágio no Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Aos meus colegas de curso com quem tive oportunidade de trabalhar ao longo do meu percurso académico, em especial aos meus companheiros João Simão, António Minhalma, os irmãos Baptista e aqueles que considero que foram os meus melhores amigos de curso, pelos grandes momentos vividos, José Cavaco e Marcos Torrado, um grande obrigado.

E porque o mais importante vem no fim, aos pilares da minha vida, pais e irmãs, que me ajudaram incansavelmente e acreditaram em mim quando tudo parecia impossível, a eles dedico esta vitória.

*Deus deu-me um destino, o caminho cabe-me a mim construí-lo...*



# RESUMO

---

O presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos de interação entre as ondas e um quebra-mar, mais concretamente, o fenómeno de galgamento sobre quebra-mares de talude, através da modelação numérica. Simultaneamente, a análise e compreensão da técnica de acoplamento entre malhas de discretização diferente de um mesmo modelo, da forma de geração de ondas e das características dos mantos de quebra-mar nos resultados do modelo fazem, também, parte desta dissertação.

O estudo incide no caso do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira, no Algarve, que é o caso estudado do projeto de investigação “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) para aplicações a estruturas costeiras” e para o qual existem dados de ensaios de laboratório.

Conhecendo as características do perfil da secção do quebra-mar em estudo e também das condições de agitação anteriormente ensaiadas em modelo físico no âmbito desse projeto, realizaram-se várias simulações aplicando o modelo bidimensional IH2-2VOF, baseado nas equações RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes), complementado com um modelo de turbulência (modelo  $k-\epsilon$ ) e um método de definição da superfície livre (Volume Of Fluid).

Com base nas simulações efetuadas verificou-se a influência da utilização da técnica de acoplamento nos resultados de superfície livre e galgamento. Esta técnica foi aplicada para estudar toda a extensão do canal através de aplicação de um mesmo modelo mas utilizando duas discretizações diferentes, com o principal objetivo de reduzir o tempo total de cálculo computacional e ao mesmo tempo, garantindo a adequada precisão dos resultados. Verificou-se ainda a influência nos resultados do tipo de batedor utilizado para gerar a agitação e das características dos mantos que compõem o quebra-mar, no que diz respeito às alterações dos parâmetros característicos dos meios porosos, quer ao nível da porosidade (ou impermeabilidade), quer ao nível da variação do coeficiente de atrito não linear.

Quanto ao acoplamento, verificou-se que se obtém resultados precisos utilizando batedor estático na geração das ondas na secção de acoplamento. No caso de utilizar um batedor dinâmico, considerando apenas a harmónica principal, a precisão dos resultados é mais reduzida.

**Palavras-chave:** Modelação numérica, IH-2VOF, acoplamento, estruturas costeiras, galgamento.



# ABSTRACT

---

The present study aims to analyse the interaction effects between waves and a breakwater, specifically the overtopping phenomenon on rubble-mound breakwaters by numerical modelling. At the same time, the analysis and understanding of the technique of coupling between two different discretization mesh of a same model, the form of wave generation and the characteristics of breakwater layers in the results of the models are also part of this dissertation.

The study focuses on the case of West breakwater from Porto de Pesca de Albufeira, in Algarve, which is the case studied of the research project "SPACE – development and validation of a model Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) for applications to coastal structures" and for which there are data from laboratory tests.

Knowing the characteristics of the cross-section of the breakwater in study and also wave conditions previously tested in physical model in the context of this project, various simulations were conducted by applying the two-dimensional IH-2VOF model based on equations RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes), complemented with a turbulence model (model k- $\epsilon$ ) and a method of track the free surface (Volume Of Fluid).

Based on the simulations performed it was observed that there is an influence of the use of the coupling technique on the results of free surface and mean overtopping discharge. This technique was applied to study the entire length of the flume through application of a same model but using two different mesh discretization, with the primary goal of reducing the total computational time and, at the same time, ensuring the adequate accuracy of results. It was also found to influence the results the type of paddle used to the wave generation and the characteristics of the layers which compose the breakwater with respect of parameters of porous, both the level of porosity (or impermeability), both at the level of changing the value of non-linear coefficient.

As to the coupling technique, it was found that results with a better accuracy can be obtained if a static paddle is considered for the wave generation at the coupling section. In case of using a dynamic paddle, considering just only the main harmonic, the accuracy of results is reduced.

**Key-words:** Numerical modelling, IH-2VOF, coupling method, coastal structures, overtopping.





# LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

---

FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
UE	União Europeia
ZEE	Zona Económica Exclusiva
CIMA	Centro de Investigação Marinha e Ambiental
SPACE	Smoothed Particle Hydrodynamics model development and validation for Coastal Engineering
COBRAS	Cornell Breakingwaves And Structure
RANS	Reynolds-Averaged-Navier-Stokes
VARANS	Volume-Averaged Reynolds-Averaged-Navier-Stokes
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
VOF	Volume Of Fluid
USACE	United States Army Corps of Engineers
SWL	Still Water Level (Nível de repouso em linguagem anglo-saxónica)
NR	Nível de Repouso
ZH	Zero Hidrográfico
BM	Baixa-mar
PM	Preia-mar
COI	Canal de Ondas Irregulares
Bias	Erro médio
Rmse	Root Mean Square Error (Erro médio quadrático em linguagem anglo-saxónica)
Ic	Índice de Concordância

FFT	Fast Fourier Transformer (Transformada Rápida de Fourier)
DFT	Discrete Fourier Transformer (Transformada Discreta de Fourier)
TOT	Enrocamento de “Todo-O-Tamanho”

# LISTA DE SÍMBOLOS

---

$a$	Coeficiente dimensional na relação de Forchheimer generalizada	[-]
$A$ ou $A_0$	Amplitude de onda	[m]
$A_c$	Amplitude da crista ou Altura da berma da estrutura acima do nível de repouso	[m]
$A_s$	Amplitude da cava	[m]
$b$	Coeficiente dimensional na relação de Forchheimer generalizada	[-]
$c$	Celeridade da onda	[m/s]
$c_0$	Celeridade da onda numa determinada posição	[m/s]
$c$	Coeficiente dimensional na relação de Forchheimer generalizada	[-]
$d$	Coeficiente dimensional na relação de Forchheimer generalizada	[-]
$dx$	Dimensão da célula segundo a direção x no modelo IH-2VOF	[m]
$dy$	Dimensão da célula segundo a direção y no modelo IH-2VOF	[m]
$D_{50}$	Diâmetro característico do material que constitui o meio poroso	[m]
$F_r$	Número de Froude	[-]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$G_c$	Largura da berma da estrutura (Figura 2.9)	[m]
$h$ ou $d$	Profundidade	[m]
$h_r$	Profundidade relativa	[-]
$H$	Altura de onda	[m]
$H_r$	Altura relativa	[-]
$H_S$ ou $H_{1/3}$	Altura significativa de onda ou Altura média do terço das ondas mais altas	[m]
$H_0$ ou $H_{m0}$	Altura de onda ao largo	[m]

I	Gradiente Hidráulico	[-]
L	Comprimento de onda	[m]
$L_0$ ou $L_{om}$	Comprimento de onda ao largo, calculado com período médio	[m]
$L_{op}$	Comprimento de onda ao largo, calculado com período de pico	[m]
n	Porosidade	[-]
$N_l$	Escala geométrica	[-]
$N_q$	Escala do caudal	[-]
$N_t$	Escala do tempo	[-]
p	Campo de pressões	[-]
Q	Caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura	[m <sup>3</sup> /s/m]
$R_c$	Altura da estrutura acima do nível de repouso (Figura 2.9)	[m]
$R_d$	Refluxo (run-down)	[m]
$R_u$	Espraiamento (run-up)	[m]
$R_{max}$	Espraiamento máximo	[m]
$S_d$	Declividade da onda	[-]
$s_{d,om}$	Declividade de onda, calculado com período médio	[-]
$s_{d,pm}$	Declividade de onda, calculado com período de pico	[-]
t	Instante de tempo	[s]
T	Período de onda	[s]
$T_m$	Período médio das ondas de um registo	[s]
$T_{max}$	Período de onda máximo registado	[s]
$T_p$	Período de pico de espectro	[s]
u	Velocidade aparente do escoamento no meio poroso	[m/s]

$u_i$	Velocidade instantânea do escoamento	[m/s]
$u_i$	Campo de velocidades instantâneas	[m/s]
$\bar{u}_i$	Velocidades médias	[m/s]
$u'_i$	Velocidades turbulentas	[m/s]
$x$	Comprimento ou distância na direção horizontal	[m]
$y$ ou $z$	Comprimento ou distância na direção vertical	[m]
$\alpha$	Coeficiente de atrito linear	[-]
$\alpha$	Ângulo de inclinação do talude com o plano horizontal	[°]
$\beta$	Coeficiente de atrito não linear	[-]
$\beta$	Ângulo de incidência da onda sobre a estrutura	[°]
$\Delta t$	Intervalo de tempo	[s]
$\Delta x$	Dimensão da célula segundo a direção $x$	[m]
$\Delta y$	Dimensão da célula segundo a direção $y$	[m]
$\lambda$	Escala	[-]
$\gamma$	Coeficiente de massa adicionada	[-]
$\eta$	Superfície livre da água	[-]
$\pi$	Constante de Arquimedes	[-]
$\rho$	Densidade do fluido	[kg/m <sup>3</sup> ]
$v$	Velocidade de escoamento na determinação do n° de Froude	[m/s]
$\nu$	Viscosidade cinemática na determinação dos coeficientes de Forchheimer	[-]
$\xi$	Número de Iribarren	[-]
$\bar{\tau}_{ij}$	Tensor das tensões médias viscosas	[-]



# ÍNDICE

---

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento do tema .....	1
1.2	Objetivos e contribuições .....	5
1.3	Organização da dissertação .....	6
<b>2</b>	<b>O fenómeno do galgamento .....</b>	<b>7</b>
2.1	Considerações gerais .....	7
2.1.1	Agitação marítima .....	7
2.1.2	Características das ondas .....	8
2.1.3	Teoria linear das ondas .....	11
2.2	Definição de galgamento .....	13
2.3	Factores condicionantes do galgamento.....	16
2.3.1	Agitação marítima .....	16
2.3.2	Nível de água .....	19
2.3.3	Geometria da estrutura.....	19
2.3.4	Outros fatores .....	21
<b>3</b>	<b>O modelo numérico IH-2VOF .....</b>	<b>23</b>
3.1	Considerações gerais .....	23
3.2	Formulação matemática .....	24
3.2.1	Equações governativas .....	24
3.2.2	Condições iniciais e de fronteira.....	27
3.2.3	Identificação da superfície livre.....	27
3.2.4	Domínio computacional.....	28
3.3	Geração da onda .....	29
3.4	Geração da malha .....	30
3.5	Interface, dados e resultados .....	35

3.6	Cálculo do galgamento .....	36
<b>4</b>	<b>O caso de estudo .....</b>	<b>39</b>
4.1	Considerações gerais .....	39
4.2	O Porto de pesca de Albufeira .....	39
4.3	Condições de agitação local .....	41
4.4	Modelação física.....	42
4.4.1	Teoria da semelhança e efeitos de escala .....	42
4.4.2	Configuração do modelo físico.....	44
<b>5</b>	<b>Análise da influência do sistema de geração de ondas e do acoplamento de malhas nos resultados do modelo.....</b>	<b>49</b>
5.1	Considerações gerais .....	49
5.2	Malha do modelo numérico.....	50
5.3	Canal com fundo horizontal .....	51
5.4	Canal com fundo em rampa.....	61
5.5	Canal com a secção transversal do quebra-mar poente do Porto de Albufeira .....	69
<b>6</b>	<b>Análise da influência das características do núcleo e dos mantos constituintes .....</b>	<b>77</b>
6.1	Casos estudados .....	77
6.2	Núcleo e manto secundário impermeáveis .....	78
6.3	Manto principal .....	83
<b>7</b>	<b>Conclusões e desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>89</b>
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>91</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1: Perfis transversais de diferentes tipos de quebra-mares [2].....	2
Figura 1.2: Constituição de um quebra-mar de estrutura mista.....	3
Figura 1.3: Exemplos de blocos artificiais de betão [4].....	4
Figura 1.4: Exemplos de fenómenos de galgamento sobre estruturas de proteção.....	5
Figura 2.1: Tipos de onda em função do seu período/frequência e da natureza das forças geradoras (Adaptado de [4]).....	7
Figura 2.2: Características das ondas, perfil vertical de duas ondas sucessivas [27]. ....	9
Figura 2.3: Órbita das partículas das ondas em águas profundas (a) e águas pouco profundas (b) [27].....	10
Figura 2.4: Expressões da celeridade para zonas de diferentes profundidades [4].....	12
Figura 2.5: Teorias de ondas. Gráfico de Le Méhauté, 1976, das várias regiões onde são validas as teorias de ondas (Adaptado de [4]).....	13
Figura 2.6: Esquema representativo do fenómeno do galgamento [22].....	14
Figura 2.7: Fenómeno de espraio e refluxo.....	14
Figura 2.8: Valores críticos de caudal de galgamento (Adaptado de [4]).....	16
Figura 2.9: Tipos de rebentação de ondas (Adaptado de [28]).....	18
Figura 2.10: Parâmetros da estrutura que influenciam o fenómeno do galgamento [29].....	21
Figura 2.11: Ângulo entre a direção da onda e a direção normal à estrutura [26].....	22
Figura 3.1: Média de volume realizada pelo VARANS através do RANS.....	25
Figura 3.2: Esquema do domínio computacional numa célula, baseada na informação da função VOF [20].....	28
Figura 3.3: Representação dos eixos ortogonais e respetivas direções da malha computacional. ....	29
Figura 3.4: Exemplo da janela de visualização do software CORAL, para a criação da malha. ....	31
Figura 3.5: Fenómeno de falsa rebentação [6]. ....	34
Figura 3.6: Verificação da qualidade da malha.....	34
Figura 3.7: Exemplo de uma malha não uniforme modelada no CORAL.....	35
Figura 3.8: Janela de interface do IH-2VOF.....	36
Figura 3.9: Determinação do galgamento – esquema representativo do processo de cálculo.....	37
Figura 4.1: Vista aérea das estruturas de proteção marítima do porto de pesca de Albufeira, com destaque do quebra-mar Poente (Imagem Google Earth).....	40
Figura 4.2: Imagem aérea do Porto de Pesca de Albufeira (B) Localização da secção transversal onde incidiu o estudo [13].....	41
Figura 4.3: Secção em estudo.....	41
Figura 4.4: Canal de Ondas Irregular 1, situado no Departamento de Hidráulica e Ambiente [24].....	45
Figura 4.5: Representação esquemática do perfil longitudinal do canal de ondas. [16].....	45
Figura 4.6: Perfil do canal e quebra-mar - Posição das sondas. [16].....	46

Figura 5.1: Canal Total e Canal Parcial.....	50
Figura 5.2: Representação esquemática do perfil do canal total com fundo horizontal plano.....	52
Figura 5.3: Canal parcial estático de fundo plano. ....	52
Figura 5.4: Canal parcial dinâmico (regular) de fundo plano.....	53
Figura 5.5: Valores de amplitude e fase obtidos pelas transformadas de Fourier.....	54
Figura 5.6: Série temporal utilizada no modelo IH-2VOF para o canal parcial dinâmico (regular) e parcial estático.....	55
Figura 5.7: Variação Superfície Livre registada nas sondas G6, G7 e G8 – Fundo Plano.....	56
Figura 5.8: Perfil de velocidades horizontais nas sondas G7 e G8.....	59
Figura 5.9: Perfis de velocidades horizontais nas sondas G9 e G10.....	60
Figura 5.10: Representação esquemática do perfil do canal total com fundo inclinado.....	61
Figura 5.11: Canal Parcial Estático com fundo inclinado. ....	62
Figura 5.12: Canal Parcial Dinâmico (regular) com fundo inclinado. ....	62
Figura 5.13: Série temporal utilizada no modelo IH-2VOF para o Canal Parcial Dinâmico (regular) e Parcial Estático.....	62
Figura 5.14: Variação superfície livre registada nas sondas G7 e G8 – fundo inclinado.....	63
Figura 5.15: Variação superfície livre registada nas sondas G9 – fundo inclinado.....	64
Figura 5.16: Valores de amplitude e de fase - comparação entre o sinal da onda regular e do sinal obtido para a onda reconstruída através do método FFT. ....	64
Figura 5.17: Espectro de amplitudes do sinal registado na sonda G7 nos diferentes canais. ....	65
Figura 5.18: Perfil de velocidade máxima e mínima - Sonda G7.....	67
Figura 5.19: Velocidade horizontal - Sequência da passagem de onda junto à sonda G7.....	67
Figura 5.20: Variação da superfície livre obtida na sonda G7 para o Canal Parcial Dinâmico (regular) e o Canal Parcial Estático (regular).....	68
Figura 5.21: Representação esquemática do perfil do Canal Total do caso de estudo. ....	69
Figura 5.22: Canal Parcial Estático - análise com estrutura.....	70
Figura 5.23: Canal Parcial Dinâmico (regular) - análise com estrutura. ....	70
Figura 5.24: Variação da superfície livre registada nas sondas G7, G8, G9 e G10 – Canal com estrutura. ....	71
Figura 5.25: Espectro de amplitude dos sinais registados na sonda G7 nos vários canais.....	72
Figura 5.26: Perfil de velocidade máxima e mínima - Sonda G7, canal com estrutura.....	74
Figura 5.27: Secção e altura a que se pretende analisar o caudal de galgamento.....	75
Figura 5.28: Valores de caudal galgado médio. ....	75
Figura 6.1: Exemplo do modelo do quebra-mar aplicado no modelo numérico SPH [18]. ....	77
Figura 6.2: Modelo da secção do quebra-mar, ensaio com núcleo impermeável.....	78
Figura 6.3: Modelo da secção do quebra-mar, ensaio com núcleo e manto secundário impermeáveis. ....	78
Figura 6.4: Valores de caudal médio, tendo em conta as diferentes modelações.....	79
Figura 6.5: Variação da superfície livre registada nas sondas G7 a G11 para os diferentes casos simulados. ....	80

Figura 6.6: Sequência do curso de uma onda e respetivo galgamento sobre o quebra-mar.....	82
Figura 6.7: Sequência do curso de uma onda e respetivo galgamento sobre o quebra-mar – núcleo e manto impermeáveis.....	83
Figura 6.8: Caudal médio obtido para diferentes valores de $\beta$ em modelo numérico e o obtido em modelo físico. ....	85
Figura 6.9: Variação da superfície livre registada nas sondas G8 a G11 para as diferentes configurações do parâmetro $\beta$ . ....	86



# ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 3.1: Valores recomendados para $\alpha$ e $\beta$ (adaptado de [12]).....	33
Tabela 4.1: Métodos de escala segundo a Semelhança de Froude (adaptado de [16]).....	44
Tabela 4.2: Posição das sondas ao longo do canal.....	46
Tabela 4.3: Alturas de onda em cada sonda nos ensaios realizados em modelo físico com $T=12s$ .....	47
Tabela 5.1: Esquema representativo da malha para o canal total. ....	51
Tabela 5.2: Condição de agitação para ensaio em canal com fundo horizontal. ....	52
Tabela 5.3: Análise do erro entre os resultados numéricos do canal total e os canais parciais.....	57
Tabela 5.4: Análise do erro entre os resultados numéricos do Canal Total e os Canais Parciais.....	66
Tabela 5.5: Análise do erro entre os resultados numéricos do Canal Parcial Dinâmico (regular) e do Canal Estático (regular).....	68
Tabela 5.6: Características dos mantos constituintes da estrutura. ....	70
Tabela 5.7: Análise do erro entre os resultados numéricos do Canal Total e os Canais Parciais. ....	73
Tabela 6.1: Análise de erro entre as diferentes configurações da secção do quebra-mar.....	81
Tabela 6.2: Valores dos parâmetros dos meios porosos considerados. ....	84
Tabela 6.3: Erro relativo de $H_{médio}$ entre modelo físico e modelos numéricos.....	87



# CAPÍTULO I

## Introdução

### 1.1 Enquadramento do tema

Portugal tem características geográficas que o distinguem de muitos outros países. A sua vasta zona costeira tem possibilitado à população portuguesa, ao longo da história, a exploração de recursos marinhos e de todo um vasto leque de atividades associadas ao mar. Assim, é inegável a importância que a costa portuguesa tem para o desenvolvimento económico e social do país.

Portugal apresentou, em 2009, uma proposta para o alargamento da sua Zona Económica Exclusiva (ZEE), visando o aumento de 1.727.408 km<sup>2</sup> para 3.027.408 km<sup>2</sup> de área no total, o que faz com que seja a 10<sup>a</sup> maior ZEE do mundo e maior da União Europeia (EU). Consequentemente as atividades económicas a ela associadas, tais como pesca, transporte marítimo de mercadorias e transporte de pessoas (trazendo também um acréscimo de responsabilidade em termos de segurança à navegação) são potenciadas, sendo notória a necessidade de se criarem zonas de abrigo de correntes e ondas, bem como, de serem preservadas e eventualmente expandidas as existentes, convergindo assim para a criação de áreas abrigadas e portos artificiais. Estas condições de abrigo são garantidas por estruturas desenhadas para esses efeitos, tais como quebra-mares, diques, molhes, esporões, entre outras.

A necessidade de construir obras marítimas não é exclusiva dos portos. A própria zona costeira, devido à sua dinâmica e aos fenómenos inerentes, obriga constantemente à manutenção e construção de obras de abrigo para defesa de pessoas e outros bens locais que se encontrem particularmente expostos à ação das intempéries.

Como foi referido, um quebra-mar é uma estrutura que possibilita a criação de uma zona abrigada. A acalmia nessas zonas é conseguida devido aos fenómenos de dissipação e reflexão da energia das ondas, nesta estrutura. Define-se quebra-mar como – “Um quebra-mar é, na sua conceção mais geral, qualquer obstáculo à propagação normal de ondas de gravidade geradas pelo vento sobre uma superfície de água” [1]. Este tipo de estrutura é geralmente utilizada para fins portuários.

Existe uma grande variedade de quebra-mares, diferindo na sua geometria e elementos constituintes, que dependem essencialmente da agitação da zona e da morfologia do local onde se pretende criar a zona de abrigo e do objetivo da obra.

Quanto à sua origem, define-se como quebra-mar natural aquele que permite obter condições de abrigo por força das condições naturais da zona. Pelo contrário, os quebra-mares artificiais são os que resultam da ação do homem.

Quanto à sua posição em relação à linha de costa, um quebra-mar (natural ou artificial) pode estar ligado a terra, designando-se por quebra-mar enraizado, ou estar afastado da linha de costa, designando-se por quebra-mar destacado.

Quanto ao seu perfil transversal, existem vários tipos de quebra-mares artificiais, dentro dos quais podemos distinguir quebra-mares de talude, quebra-mares verticais, quebra-mares mistos e quebra-mares de estrutura mista [2]. Na Figura 1.1 apresentam-se os perfis transversais referidos anteriormente.

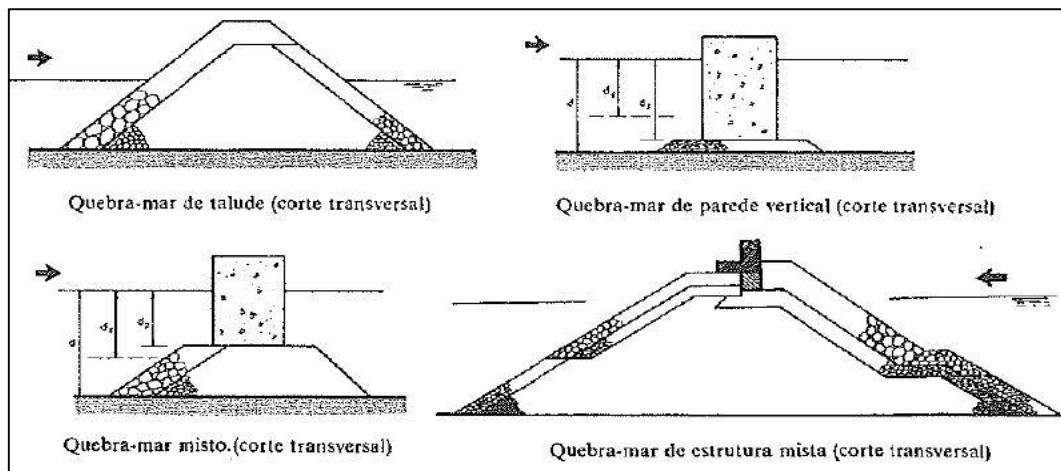


Figura 1.1: Perfis transversais de diferentes tipos de quebra-mares [2].

Os quebra-mares de talude podem apresentar um manto resistente, que tem como função dar estabilidade à estrutura face à agitação, e os filtros, que têm como função evitar a saída de finos da estrutura. Podem ainda ter uma superestrutura no topo superior do talude que pode englobar um muro cortina onde, do lado de barlar, pode possuir um deflector de ondas com o objetivo de reduzir o galgamento.

Genericamente, um quebra-mar de talude, como mostra a Figura 1.2, é composto pelos seguintes elementos [2]:



- **Manto resistente**, faixa do talude, que tem como função resistir de forma direta face à agitação marítima. É constituído por blocos de pedra natural ou de betão armado pré-fabricado, cujas formas podem variar. O manto resistente pode ser formado por uma, duas ou mais camadas, consoante o tipo de blocos utilizados e a solução estrutural;
- **Núcleo**, zona interior do quebra-mar, constituída por enrocamento de todo o tamanho (TOT);
- **Filtros**, zona intermédia do quebra-mar que estabelece a interface entre o núcleo e o manto resistente. Tem como função impedir a saída dos elementos finos do núcleo, conferindo assim o seu confinamento;
- **Banqueta**, prisma de enrocamento, localizado no pé do talude, que serve de suporte ao manto resistente;
- **Berma**, zona particular dos quebra-mares de talude mistos, é a superfície horizontal de coroamento do talude anterior;
- **Coroamento**, superfície constituída pelos pontos de maior cota de um quebra-mar;
- **Superestrutura**, estrutura em betão que constitui o coroamento de um quebra-mar de estrutura mista, e que tem como objetivo facilitar o acesso e minimizar os galgamentos;
- **Muro cortina**, quando existe, representa a parte da superestrutura que tem como objetivo a redução dos galgamentos.

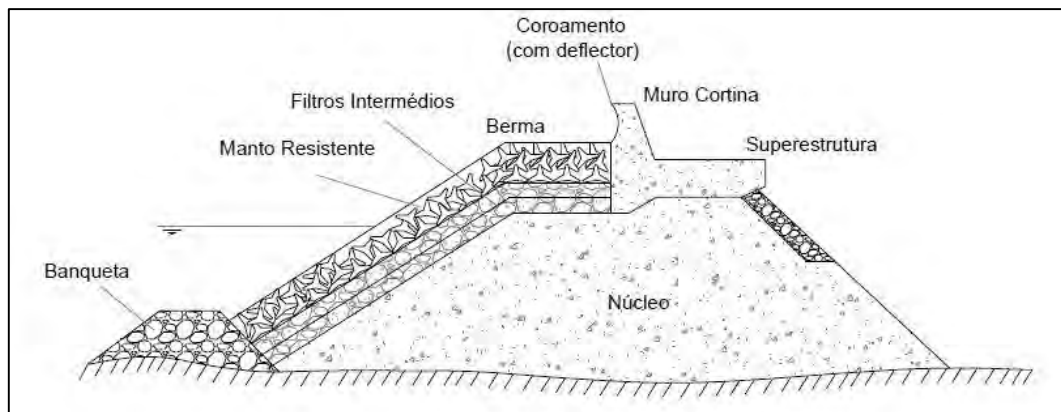


Figura 1.2: Constituição de um quebra-mar de estrutura mista.

Os mantos resistentes dos quebra-mares, como foi mencionado, podem ser constituídos por enrocamento ou por elementos de betão pré-fabricado, específicos para o efeito, denominados por blocos artificiais de betão. Estes blocos podem apresentar inúmeros formatos, de que são exemplo os que se apresentam na Figura 1.3.

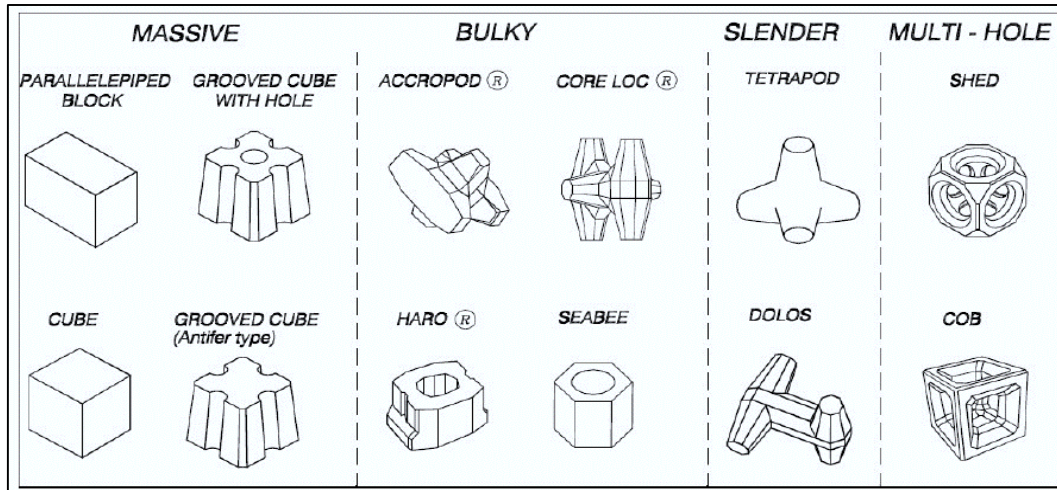


Figura 1.3: Exemplos de blocos artificiais de betão [4].

O dimensionamento dos blocos é feito com base em fórmulas semi-empíricas, definindo-se o peso dos blocos que resistem à ação das ondas que atuarão sobre a estrutura durante a sua vida útil.

Além do dimensionamento estrutural, é necessário também efetuar o dimensionamento hidráulico, onde se define a geometria tendo em conta a funcionalidade da obra, ou seja, analisa-se a transformação das ondas ao alcançarem a estrutura, concretamente, define-se a geometria da estrutura com base em valores limites definidos de reflexão, transmissão e/ou galgamento.

A delimitação da cota de coroamento é um fator crucial para se conseguir a funcionalidade pretendida da estrutura, concretamente, para se reduzir o galgamento, já que este é um fenómeno que pode causar agitação indesejável no tardo da estrutura e comprometer a estabilidade do manto interior da obra, como se mostra um exemplo na Figura 1.4



*Figura 1.4: Exemplos de fenómenos de galgamento sobre estruturas de proteção.*

A determinação do galgamento de uma dada estrutura para determinadas condições de agitação, com o objetivo de verificar que não ultrapassa o máximo admissível tem-se baseado, geralmente, no uso de ferramentas empíricas e semi-empíricas. Contudo, a aplicação destas ferramentas encontra-se fortemente limitada aos casos, em termos de condições de agitação e de geometria de estrutura, para os quais foram definidas, recorrendo-se frequentemente, em fases mais avançadas do projeto, à validação da funcionalidade da estrutura através de modelos físicos. Desta forma, a modelação física continua a ser uma ferramenta muito importante no dimensionamento de estruturas marítimas. No entanto, depende bastante tempo e necessita de infraestruturas e equipamentos adequados.

Por conseguinte, nos últimos anos têm sido desenvolvidos inúmeros modelos numéricos com o objetivo de obter respostas às várias questões ligadas aos fenómenos que ocorrem na interação onda-estrutura. Apesar das limitações que estes modelos ainda possam apresentar, tem-se vindo a demonstrar a sua utilidade e adaptabilidade às várias situações a modelar.

### **1.2 Objetivos e contribuições**

O objetivo geral deste trabalho é o estudo do fenómeno do galgamento em estruturas marítimas, em particular o caso do quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira. O processo de estudo do galgamento foi desenvolvido através de ferramentas de cálculo numérico (IH-2VOF), específicas para a análise de fenómenos de interação entre ondas e estruturas marítimas, como é o caso do galgamento.

Através das várias análises efetuadas e da metodologia aplicada, pretende-se igualmente compreender o processo de acoplamento de malhas, para que, através da análise dos resultados, seja possível concluir se a sua utilização é ou não vantajosa na resolução de problemas mais

complexos. Pretende-se ainda verificar a influência, nos resultados do galgamento, do tipo de batedor numérico utilizado e da permeabilidade dos mantos do quebra-mar.

### **1.3 Organização da dissertação**

A presente dissertação é composta por seis capítulos estruturados da seguinte forma:

Capítulo I: Introdução – apresentação e enquadramento do problema e dos objetivos do trabalho.

Capítulo II: Fenómeno do galgamento – abordagem aos fenómenos físicos relacionados com a interação entre agitação marítima e estruturas marítimas, com destaque para o fenómeno do galgamento.

Capítulo III: O modelo numérico IH-2VOF – descrição do modelo numérico utilizado e da sua base matemática, bem como o procedimento para a sua aplicação.

Capítulo IV: O caso de estudo – apresenta-se neste capítulo o caso de estudo, incluindo uma caracterização geral do modelo e do protótipo, assim como das condições de agitação marítima local.

Capítulo V: Análise dos casos de estudo – apresentam-se as simulações efetuadas com o modelo IH-2VOF e a análise dos resultados no que se refere à influência do acoplamento e do batedor (estático ou dinâmico).

Capítulo VI: Análise da influência das características do núcleo e dos mantos constituintes - Apresenta-se a análise efetuada sobre a influência das características dos mantos que compõem a estrutura, nos resultados do modelo.

Capítulo VII: Conclusões e desenvolvimentos futuros – Conclusões finais e enumeração de possíveis abordagens a realizar em trabalhos futuros.

## CAPÍTULO II

# O fenómeno do galgamento

### 2.1 Considerações gerais

Antes de abordar o fenómeno do galgamento, serão introduzidos, neste capítulo, alguns conceitos de base acerca da agitação marítima e da sua caracterização.

#### 2.1.1 Agitação marítima

A agitação marítima é composta, essencialmente, por ondas de vento, que resultam da interação entre a atmosfera e a superfície do oceano, isto é, ondas formadas pela transferência de energia do vento para a superfície do mar, sendo que a força restabeecedora é a gravítica ou a tensão superficial.

Na Figura 2.1, apresentam-se os diferentes tipos de ondas, classificados segundo o seu período/frequência e a sua força geradora.

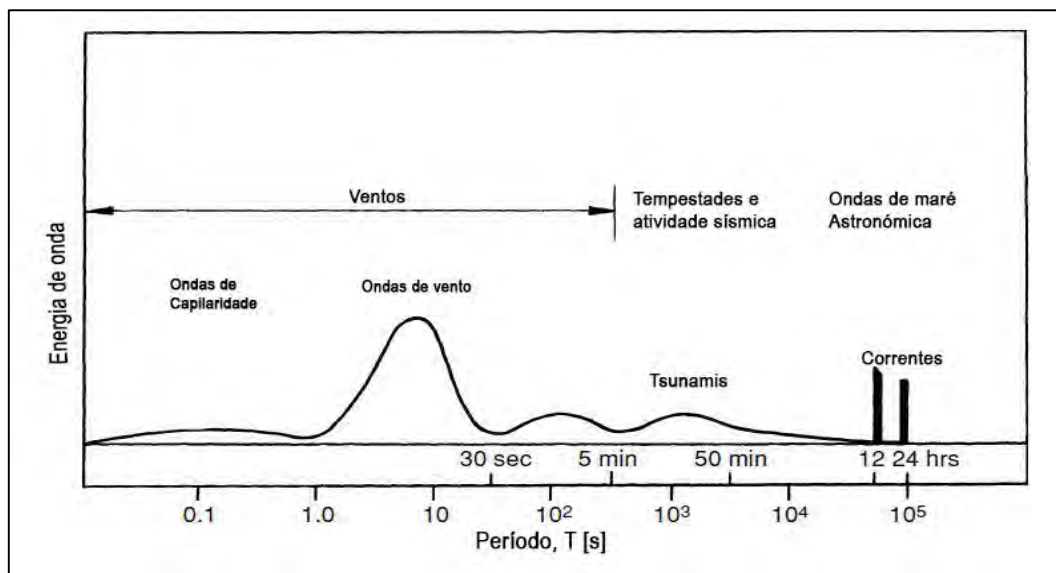


Figura 2.1: Tipos de onda em função do seu período/frequência e da natureza das forças geradoras (Adaptado de [4]).

As características das ondas dependem da intensidade do vento, do intervalo de tempo durante o qual o vento se mantém e também das condições do local onde o vento sopra, ou seja, do espaço que existe livre sem obstáculos à ação do vento (“fetch”).

Dentro das ondas superficiais, formadas pela ação do vento, consideram-se dois tipos, ondulação e vaga:

- **Ondulação**, conhecida por “swell” na literatura anglo-saxónica, são ondas geradas em locais muito distantes do local de observação, distando da ordem dos milhares de quilómetros.
- **Vaga**, conhecida por “sea” na literatura anglo-saxónica, são ondas próximas da zona de geração, formadas por ventos locais.

### 2.1.2 Características das ondas

As ondas têm características que dependem, naturalmente, das forças responsáveis pela sua formação. Os principais parâmetros característicos das ondas (Figura 2.2) são os seguintes:

- Período de onda ( $T$ ): Tempo que decorre entre a passagem de dois pontos idênticos da superfície livre, por exemplo, entre duas cavas ou entre duas cristas;
- Comprimento de onda ( $L$ ): Distância entre dois pontos idênticos sucessivos da superfície livre, por exemplo, distância entre duas cristas sucessivas;
- Altura de onda ( $H$ ): Distância vertical medida entre o ponto mais baixo da cava e o ponto mais alto da crista;
- Amplitude da cava ( $A_s$ ): Distância entre o nível de repouso da água e o ponto mais baixo da cava;
- Amplitude da crista ( $A_c$ ): Distância entre o nível de repouso da água e o ponto mais alto da crista;
- Profundidade ( $d$  ou  $h$ ): Distância entre o nível de repouso da água e o fundo;
- Superfície livre da água ( $\eta$ ): Distância entre o nível de repouso da água e a superfície livre da mesma, num dado instante;

Existem outros parâmetros, derivados dos anteriores, que são igualmente utilizados para caracterizar as ondas:

- Amplitude de onda ( $A_0$ ): Corresponde à metade da altura de onda, no caso das ondas sinusoidais,  $A_0 = \frac{H}{2} = (A_s + A_c)/2$
- Declividade da onda ( $S_d$ ): Quociente entre a altura de onda e o seu comprimento,  $S_d = H/L$ ;
- Profundidade relativa ( $h_r$ ): Quociente entre a profundidade e o comprimento de onda,  $h_r = h/L$ ;
- Altura relativa ( $H_r$ ): Quociente entre a altura da onda e a profundidade,  $H_r = H/h$ ;

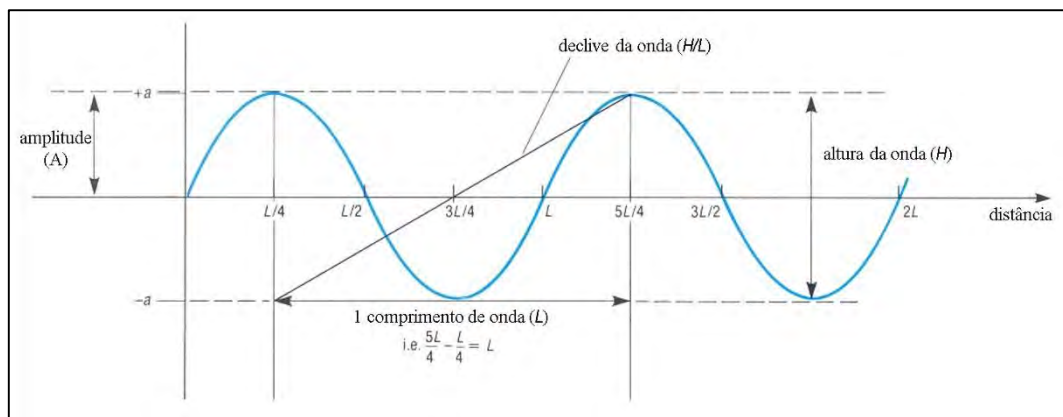


Figura 2.2: Características das ondas, perfil vertical de duas ondas sucessivas [27].

Em função do valor da profundidade relativa, pode-se classificar a profundidade em três zonas distintas :

- Grandes profundidades, quando  $h > L/2$ ;
- Profundidades intermédias, quando  $L/20 \leq h \leq L/2$ ;
- Pequenas profundidades, quando  $h < L/20$ .

O movimento das partículas de água, aquando da passagem de uma onda, varia com a profundidade relativa.

Em águas profundas, as partículas descrevem órbitas circulares com raios progressivamente menores à medida que se vai descendo na coluna de água (Figura 2.3), até que se atinge um nível

(sensivelmente igual a metade do comprimento de onda,  $L/2$ ) em que as partículas de água já não “sentem” a passagem da onda.

Quando as ondas se propagam em águas pouco profundas, as partículas passam a descrever elipses, as quais são tanto mais achatadas quanto mais próximo do fundo e, mesmo junto a este, o movimento é apenas de “vai-e-vem” horizontal.

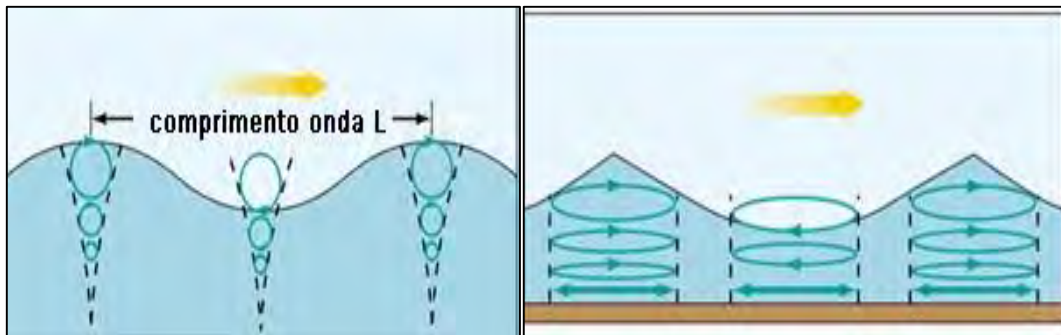


Figura 2.3: Órbita das partículas das ondas em águas profundas (a) e águas pouco profundas (b) [27].

A velocidade de propagação da onda é calculada através da relação entre o comprimento ( $L$ ) e o período ( $T$ ). A esta relação dá-se o nome de celeridade ( $c$ ).

$$c = \frac{L}{T} \quad (2-1)$$

No mar, as ondas não são regulares mas apresentam um carácter aleatório. Assim, é necessário caracterizar a agitação através de parâmetros que representem um determinado estado de mar.

Para tal pode-se utilizar uma análise no tempo, onde as ondas são definidas por uma passagem por zero no sentido ascendente ou descendente e é calculada a altura e período de cada onda de um dado estado de mar e, com base nestes valores, podem definir-se: a altura de onda significativa,  $H_s$  ou  $H_{1/3}$ , que corresponde à média do terço de ondas de altura mais elevada do estado de mar e o período  $T_m$ , que corresponde ao período médio das ondas de um registo.

A análise em frequência é também muito utilizada em hidráulica marítima. Esta análise é realizada através de uma análise harmónica ou espectral do sinal que permite estimar a energia desse estado de mar. Com base no espectro pode-se definir: a altura de onda significativa,  $H_{m0}$ , que é proporcional ao momento de ordem zero do espectro, e o período de pico do espectro,  $T_p$ , que corresponde ao inverso da frequência para a qual a energia é máxima.



### 2.1.3 Teoria linear das ondas

Existem diversas teorias que procuram representar matematicamente a forma da onda e a sua velocidade de propagação.

A teoria linear das ondas, também designada por *Teoria de Airy*, é talvez, a abordagem mais elementar de todas as teorias e é muito empregue em problemas de hidráulica marítima, tais como a geração de ondas regulares e irregulares, tanto em laboratório, como em modelos numéricos. Baseia-se nas equações da conservação da massa e da quantidade de movimento e, considerando algumas simplificações (posteriormente resumidas), permite descrever o movimento das partículas de água. Por outras palavras, é uma teoria que permite a descrição das ondas de gravidade a partir da equação de Laplace, admitindo certas hipóteses simplificativas.

A teoria linear aplica-se a ondas cuja amplitude é muito inferior ao comprimento e onde a agitação marítima é dita como a sobreposição de diversas sinusóides (sendo descrita apenas por uma sinusóide para o caso de agitação regular).

As hipóteses simplificativas da teoria linear são [3]:

- A profundidade é constante;
- O meio é bidimensional (2D);
- A forma das ondas é constante;
- O fluido é incompressível. Isto significa que a massa volúmica se mantém constante;
- O fluido não é viscoso. Esta hipótese é válida fora da camada limite do fundo;
- A tensão superficial da água é desprezável. Na realidade, as forças de tensão superficial não são relevantes quando comparadas com as forças gravíticas;
- A declividade, consequência da teoria linear da onda é:  $S_d = \frac{H}{L} \ll 0.01$ ;
- O escoamento é potencial.

Uma das expressões mais utilizadas e que deriva de se considerar válida a teoria linear é a relação de dispersão, dada por:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tan\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (2-2)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $d$  a profundidade. Esta equação traduz a relação entre a celeridade, o comprimento de onda e a profundidade a que a onda se propaga.

Para grandes e pequenas profundidades, a expressão do cálculo da celeridade pode ser simplificada, como pode ser visto na Figura 2.4.

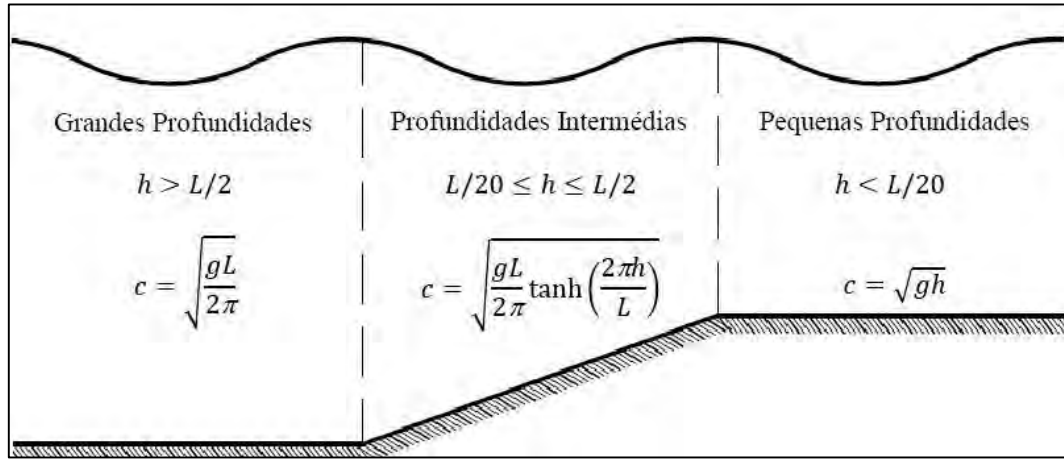


Figura 2.4: Expressões da celeridade para zonas de diferentes profundidades [4].

A componente da velocidade horizontal das partículas do fluido,  $u(x, z, t)$ , é obtida através da derivada da equação da conservação da massa:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \quad (2-3)$$

em que  $\Phi$  é o potencial de velocidade das partículas fluidas e as coordenadas horizontal e vertical são, respetivamente,  $x$  e  $z$ .

$$u(x, z, t) = \frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial x} = \frac{H k g \cosh[k(z + d)]}{2 \omega \cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2-4)$$

Da mesma forma se obtém a componente da velocidade vertical,  $w(x, z, t)$ , das partículas fluidas.

$$w(x, z, t) = \frac{\partial \Phi(x, z, t)}{\partial z} = \frac{H k g \sinh[k(z + d)]}{2 \omega \cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (2-5)$$

Como já referido, existem outras teorias que procuram representar matematicamente a forma da onda e como ela se propaga. A Figura 2.5 mostra um gráfico das diversas teorias a aplicar em função das características da onda, período  $T$  e altura  $H$ , e também em relação à profundidade do meio,  $d$ .

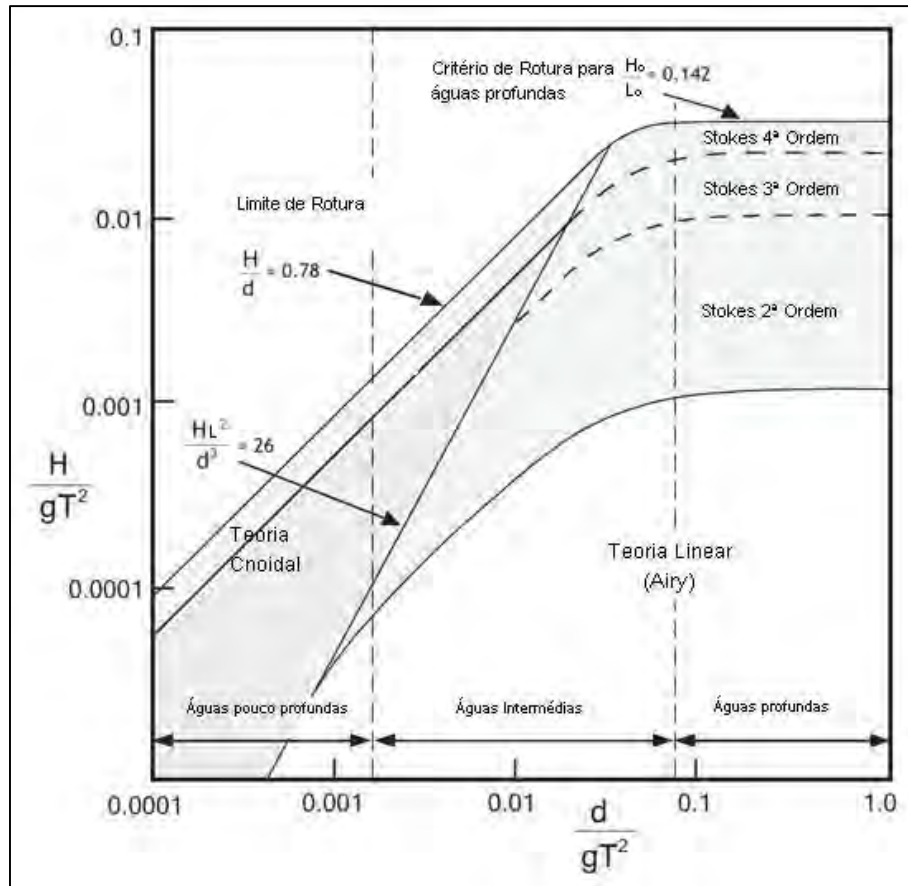


Figura 2.5: Teorias de ondas. Gráfico de Le Méhauté, 1976, das várias regiões onde são validas as teorias de ondas (Adaptado de [4]).

## 2.2 Definição de galgamento

Na interação de ondas com uma estrutura, a energia da onda que incide sobre essa estrutura é, devido à presença da estrutura, transformada através de inúmeros fenómenos: parte é dissipada, por rebentação ou por percolação no meio poroso, caso exista, parte é refletida e parte é transmitida para sotamar. A transmissão ocorre porque as estruturas marítimas não são cem por cento eficazes a reduzir a energia que atinge o lado de sotamar da estrutura, ocorrendo transmissão quer através da estrutura quando esta é porosa, quer sobre a própria estrutura, isto é, por galgamento.

Assim, o galgamento está inserido no vasto número de processos de interação onda-estrutura e define-se como a transposição de uma determinada massa de água sobre a cota de coroamento de uma estrutura emersa, Figura 2.6.

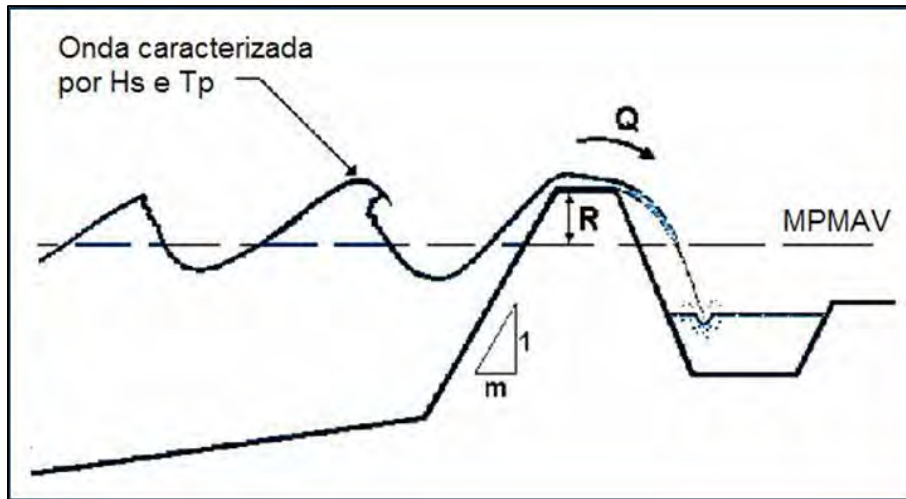


Figura 2.6: Esquema representativo do fenómeno do galgamento [22].

O galgamento está, ainda, relacionado com outro fenómeno que ocorre na interação onda-estrutura: o espraioamento.

O espraioamento (*run-up*,  $R_u$ ), define-se como a distância, medida na vertical, entre o nível máximo atingido pela onda quando interage com a estrutura e o nível de repouso, NR da água. Na Figura 2.7 está representado o espraioamento, juntamente com o refluxo (*run-down*,  $R_d$ ) que corresponde ao nível mínimo que a onda atinge, abaixo do nível de repouso da água.

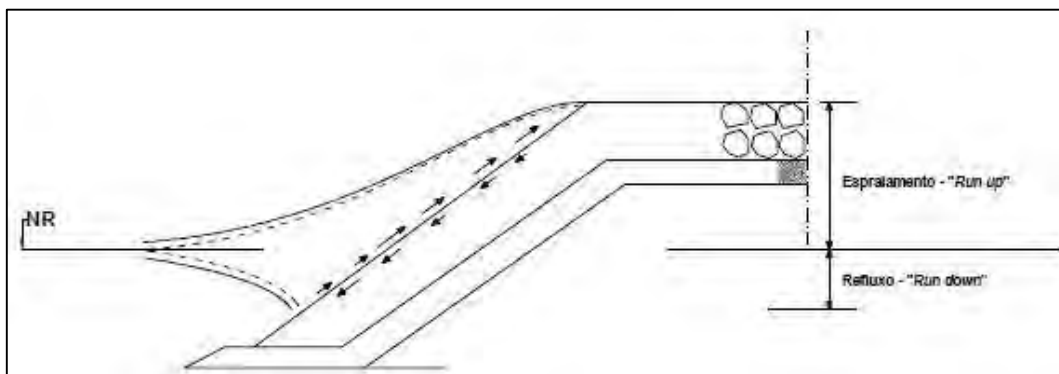


Figura 2.7: Fenómeno de espraioamento e refluxo.

Assim, quando, geometricamente, a estrutura apresenta um talude pouco extenso ou a sua cota de coroamento é insuficientemente elevada, o nível máximo de espraioamento ( $R_{max}$ ), associado ao

escoamento da onda sobre uma estrutura é excedido, e consequentemente, dá-se transposição de uma determinada quantidade de massa de água sobre a cota de coroamento da estrutura, denominada de galgamento.

O galgamento é geralmente avaliado/medido através do caudal médio ( $Q$ ) galgado por metro linear de estrutura. Em termos de unidades, representa-se por  $m^3/s/m$  ou  $l/s/m$ .

Existem três tipos principais de galgamento, que se podem classificar consoante a forma como a massa líquida passa sobre a estrutura.

Quando o espriamento é muito grande e se cria uma lâmina contínua de água que passa sobre a estrutura, verifica-se um galgamento por “green water”.

Quando o espriamento se mantém abaixo da cota de coroamento pode ocorrer outra forma de galgamento, que ocorre quando a onda rebenta sobre a parede exterior da obra e origina um grande volume de salpicos que passa sobre a estrutura (“splash”).

Por último, e apenas por ação do vento, podem ocorrer galgamentos sob a forma de borrifos (“spray”). Este processo não é muito relevante visto só ter significado quando se verifica uma forte ação do vento. No entanto, não pode ser ignorado em regiões frias, pois os borrifos podem solidificar e provocar danos.

O carácter aleatório da agitação marítima torna difícil controlar a ocorrência dos fenómenos de galgamento. Por esta razão, admite-se no dimensionamento de obras marítimas, que estas possam ser galgadas por uma determinada percentagem de ondas que incidem sobre a estrutura. Os galgamentos previstos são analisados e avaliados em função, não só dos efeitos das ondas que, como foi referido, são de grande importância para a fixação da cota de coroamento, mas também tendo em conta a função da obra e a sua geometria.

Existem na bibliografia da especialidade valores de referência de caudais admissíveis de galgamento,  $q$ , para os diferentes tipos de estrutura e respetivas funções e os possíveis danos associados. Estes valores foram determinados, ao longo de vários anos, por diversos estudos realizados em várias situações possíveis. Como exemplo, na Figura 2.8, apresenta-se o quadro resumo dos valores apresentados no Coastal Engineering Manual [4].

q (m³/s)/m	Segurança do tráfego		Segurança estrutural				q (l/s)/m						
	Veículos	Pedões	Edifícios	Retenções marginais com revest. liso	Diques relvados	Retenções marginais com revest. rugoso							
10 <sup>0</sup>	Inseguro a qualquer velocidade	Muito perigoso	Danos estruturais	Danos mesmo com protecção total	Danos	Danos em passeios pavimentados	1000						
10 <sup>-1</sup>				Danos no talude de retaguarda		Danos em passeios não pavimentados	200						
10 <sup>-2</sup>				Danos se a crista não estiver protegida		Ausência de danos	Início de danos	100					
10 <sup>-3</sup>				Ausência de danos	Ausência de danos		Ausência de danos	Ausência de danos	50				
10 <sup>-4</sup>	Inseguro estacionar sobre quebra-mares mistos	Perigo em quebra-mares verticais	20										
10 <sup>-5</sup>	Inseguro estacionar sobre quebra-mares verticais	Perigoso	Desconfortável mas sem perigo						Pequenos danos em postes de iluminação, etc.	10			
10 <sup>-6</sup>										Inseguro conduzir a alta velocidade	Molhado mas não desconfortável	Ausência de danos	2
10 <sup>-7</sup>													Condução segura a qualquer velocidade
							0.1						
							0.03						
							0.02						
							0.01						
							0.004						
							0.001						
							0.0001						

Figura 2.8: Valores críticos de caudal de galgamento (Adaptado de [4]).

## 2.3 Factores condicionantes do galgamento

### 2.3.1 Agitação marítima

A agitação marítima é o principal agente condicionante do galgamento. Caracteriza-se pelos parâmetros como a altura de onda, o período e a direção da propagação.

A influência do período é representada, indiretamente, através da declividade da onda,  $S_d$ , que relaciona a altura de onda,  $H$ , com o comprimento de onda,  $L$ . O parâmetro da declividade da onda é um parâmetro referente à altura da onda local, junto à estrutura.

Para o caso de agitação irregular, considera-se, geralmente, o valor de altura de onda significativa ao largo, isto é, em grandes profundidades ( $H_{m0}$ ) e o período médio ( $T_m$ ) ou com o período de pico ( $T_p$ ). Consoante o valor utilizado para o período, obtêm-se o comprimento de onda e a declividade, calculados por:

$$L_{om} = \frac{gT_m^2}{2\pi} \quad (2-6)$$

$$L_{op} = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (2-7)$$

$$s_{d,om} = \frac{H_{mo}}{L_{om}} \quad (2-8)$$

$$s_{d,pm} = \frac{H_{mo}}{L_{op}} \quad (2-9)$$

Onde:

$g$  – Aceleração da gravidade

$L_{om}$  – Comprimento de onda ao largo, calculado com período médio

$L_{op}$  – Comprimento de onda ao largo, calculado com período de pico

$s_{d,om}$  – Declividade de onda, calculado com período médio

$s_{d,pm}$  – Declividade de onda, calculado com período de pico

A forma como a onda rebenta sobre a estrutura, além do período e da altura de onda, é também um fator condicionante, visto que a sua influência no galgamento é também bastante significativa.

A rebentação é um fenómeno que ocorre devido à redução da profundidade, em que a onda atinge, por consequência dessa diminuição da cota do fundo, uma declividade limite, a partir da qual se instabiliza e acaba por rebentar.

O parâmetro normalmente utilizado para caracterizar o tipo de rebentação é o parâmetro de similaridade, mais conhecido pelo número de Iribarren ( $\xi$  ou  $Ir$ ), que relaciona a inclinação do talude com a declividade da onda.

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (2-10)$$

onde  $\alpha$  é o ângulo de inclinação do fundo ou que a estrutura faz com o plano horizontal,  $H_0$  é a altura de onda ao largo e  $L_0$  o correspondente comprimento de onda ao largo.

Existem diferentes formas de rebentação, que dependem, como anteriormente referido, das características das ondas e da inclinação do fundo e podem ser classificadas em função do valor do número de Iribarren (Figura 2.9):

- **Rebentação Progressiva (Spilling)** – Caracterizada por uma rebentação de pequena intensidade que ocorre quando a crista da onda se instabiliza, criando uma leve espuma –  $\xi_0 < 0.5$ ;
- **Rebentação Mergulhante (Plunging)** – Caracterizada por uma queda repentina da crista da onda –  $0.5 < \xi_0 < 3.0$ ;
- **Rebentação Colapsante (Collapsing)** – Caracterizada por uma queda abrupta da crista da onda quando esta atinge o talude acima do nível de repouso da água (NR) –  $3.0 < \xi_0 < 3.5$ ;
- **Rebentação de Fundo (Surging)** – Caracterizada por não ocorrer rebentação, mas apenas espreamento sobre o talude e reflexão –  $\xi_0 > 3.5$ .

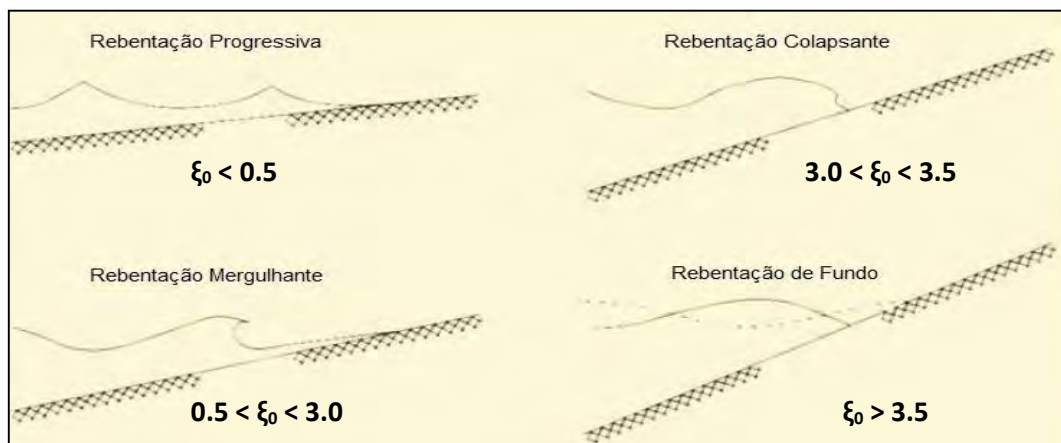


Figura 2.9: Tipos de rebentação de ondas (Adaptado de [28]).



### 2.3.2 Nível de água

O nível de água condiciona fortemente o galgamento, sendo, em geral, mais crítico nas situações em que é mais elevado e quando se associa com situações de tempestade. Este nível depende da maré e ainda de outros fatores, tais como a pressão atmosférica, ventos e a agitação marítima.

No projeto de obras marítimas normalmente são considerados no cálculo do galgamento os níveis de água correspondentes a Baixa-mar de águas vivas (BM), Preia-mar de águas vivas (PM) e Preia-mar com sobrelevação meteorológica (PM+S).

A sobrelevação meteorológica considerada no nível (PM+S) está relacionada com a maré meteorológica, que corresponde à variação do nível das águas associadas a efeitos meteorológicos e sazonais, tais como variações de pressão, ventos e alterações do caudal de rios, de periodicidade mal definida. O valor da maré meteorológica é de difícil previsão, mas pode ser obtido reduzindo-se ao valor medido em marégrafos, a maré astronómica. Em Portugal este valor, em média, não costuma exceder 0.5m [5].

Em Preia-mar, a distância entre o nível de repouso e a cota de coroamento é menor do que em condições de baixa-mar. O facto de haver uma menor área de talude emersa, leva a que possa haver uma maior probabilidade de ocorrência de galgamentos, uma vez que grande parte da energia não é dissipada no espraçamento. Assim, em geral, quanto maior for o nível de água, maiores serão os galgamentos, especialmente em caso de tempestades. Nestas situações o vento é também um fator de grande importância, pois pode originar sobrelevações do nível de água devidas a situações meteorológicas adversas (vento e pressão atmosférica).

Na análise dos níveis é necessário considerar um nível de referência vertical. Em Portugal o nível de referência utilizado em obras marítimas é o zero hidrográfico. O Zero Hidrográfico (ZH) é o nível em relação ao qual são referidas as linhas isobatimétricas das cartas náuticas, bem como as previsões de altura de maré que são publicadas nas Tabelas de Marés do Instituto Hidrográfico. Nas cartas portuguesas, o ZH corresponde ao mais baixo nível da maré registado.

### 2.3.3 Geometria da estrutura

A geometria da estrutura é um fator importante para o galgamento, na medida em que é através dela que, no caso de estruturas artificiais ou mistas, é possível minimizar os efeitos do galgamento.

O parâmetro mais importante respeitante ao efeito do galgamento é a altura a que se encontra a cota de coroamento do quebra-mar acima do nível de repouso da água,  $R_c$  (Figura 2.10), já que quanto mais alta for menor é a probabilidade de ocorrência de galgamento sobre a estrutura.

A solução mais vantajosa com vista a reduzir os danos provocados pela ocorrência deste fenómeno, seria adotar elevadas cotas de coroamento. No entanto, estas soluções requerem mais material e mão-de-obra. Este custo adicional, conjugado com o impacto visual de obras de grande porte, por vezes em zonas ambientais e turisticamente sensíveis, pode comprometer a sua viabilidade.

O galgamento pode ser reduzido ainda através da dissipação da energia das ondas incidentes na estrutura, conseguida através do escoamento numa eventual berma. A existência de uma berma de coroamento é uma solução bastante usada para redução do galgamento. A berma é caracterizada pela altura a que se encontra acima do nível de repouso,  $A_c$ , e pela sua largura,  $G_c$ , Figura 2.10. Este último parâmetro tem grande influência no galgamento, pois quanto maior for, mais energia se dissipa e consequentemente menor será a quantidade de caudal de galgamento.

Em situações de agitação mais violenta, pode adotar-se uma superestrutura, que poderá ter configuração vertical ou curva, permitindo esta última o retorno da onda incidente e consequentemente uma maior dissipação.

O ângulo de inclinação do talude ( $\alpha$ ) é também um parâmetro, relacionado com a geometria da estrutura, que influencia fortemente o galgamento. A influência deste fator é representada pelo número de Iribarren, já referido anteriormente, que relaciona o declive do talude com o declive da onda.

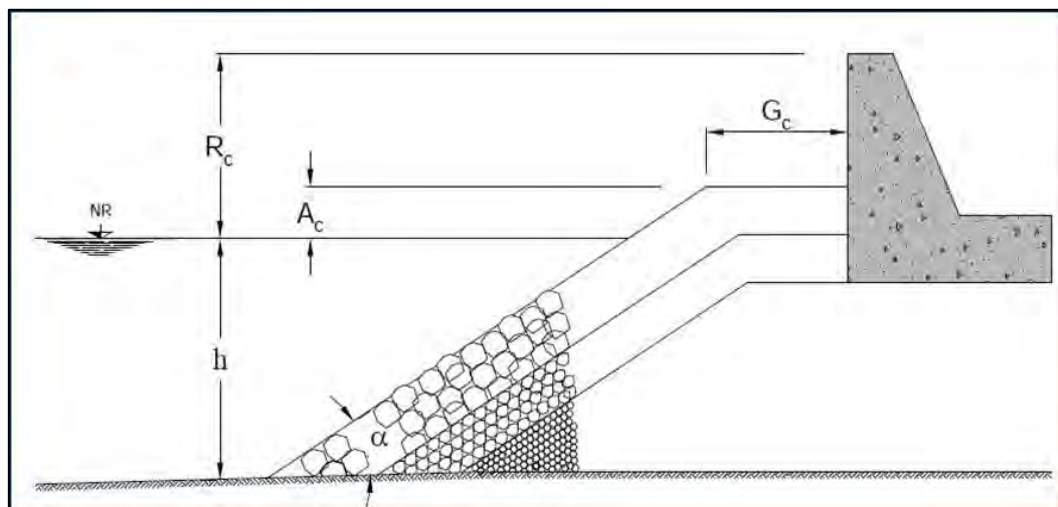


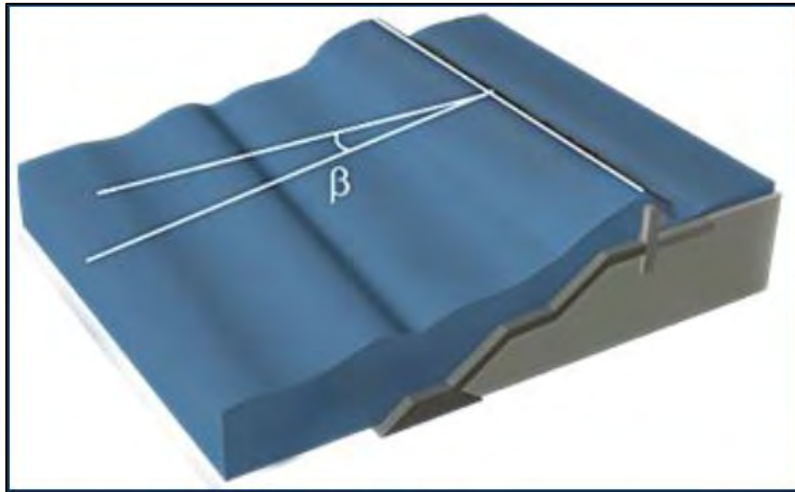
Figura 2.10: Parâmetros da estrutura que influenciam o fenómeno do galgamento [29].

#### 2.3.4 Outros fatores

Para além dos fatores já mencionados, existem ainda outros fatores que, mesmo não tendo tão forte influência para o fenómeno do galgamento como os que foram referidos, devem também ser mencionados.

A direção de propagação da onda, caracterizada pelo respetivo ângulo de incidência sobre a estrutura ( $\beta$ ), e o tipo de material constituinte dos mantos de talude dos quebra-mares, nomeadamente o grau de porosidade dos mesmos, são dois exemplos de fatores que influenciam o galgamento.

A maior parte das expressões de galgamento existentes, resultantes de ensaios experimentais bidimensionais, são aplicáveis apenas a ondas com incidência normal à estrutura ( $\beta=0^\circ$ ), Figura 2.11. No entanto, o ângulo de incidência das ondas influencia o fenómeno do galgamento e verifica-se que, quanto maior for o ângulo, menor o galgamento.



*Figura 2.11: Ângulo entre a direção da onda e a direção normal à estrutura [26].*

O galgamento é também influenciado pela rugosidade e permeabilidade do talude, que são características do tipo de material que constitui o manto de proteção da estrutura.

A forma de colocação dos blocos faz ainda alterar também quer a porosidade do manto quer a sua rugosidade. Em geral, quanto mais rugoso e permeável é o manto, maior dissipação ocorre no escoamento nesse meio e, consequentemente, menor será o galgamento.

## CAPÍTULO III

# O modelo numérico IH-2VOF

### 3.1 Considerações gerais

O IH-2VOF é um modelo numérico bidimensional que resolve as equações RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) e que foi desenvolvido especificamente para o estudo de interação de ondas com estruturas marítimas [6]. O modelo foi desenvolvido no Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria, Espanha e tem como base o modelo numérico COBRAS (COrnell BReaking waves And Structures) [6], desenvolvido na Universidade de Cornell, Estados Unidos da América, especificamente para tratar do fenómeno da rebentação e ter em conta as estruturas porosas.

O modelo contempla a geração e propagação de ondas até á proximidade de uma estrutura, impermeável ou porosa, e a interação das ondas com a estrutura. Desta forma permite analisar a interação das ondas com a estrutura, quer na sua componente hidráulica (reflexão, galgamento, entre outras), quer no caso de estruturas impermeáveis, estrutural (forças na estrutura). A superfície livre é obtida utilizando uma técnica de volume de fluido (VOF), que permite seguir superfície livre com formas complexas, como ocorre no caso de rebentação de ondas.

O IH-2VOF é um modelo numérico bastante versátil, que permite modelar um canal bidimensional com vários âmbitos de aplicação, nomeadamente:

- Propagação e transformação de ondas;
- Interação de ondas com estruturas costeiras, obtendo-se simulações realistas para fenómenos como o espraçamento, a reflexão, o galgamento, a transmissão e a pressão hidrodinâmica atuante nas superfícies destas;
- Estudo da turbulência e vorticidade envolvida no processo de rebentação;
- Descrição de escoamentos em superfície livre, em meios porosos e em torno de obstáculos impermeáveis.

A descrição do modelo, incluindo a sua formulação matemática, os dados de entrada (inputs) e saída do modelo (outputs), pode ser encontrada no manual do modelo [6].

Neste capítulo faz-se um breve resumo das principais características do modelo, descrevendo-se separadamente a geração de ondas e o cálculo do galgamento, assuntos que vão ser alvo de análise nesta dissertação.

## 3.2 Formulação matemática

### 3.2.1 Equações governativas

O modelo IH-2VOF, como já foi referido, tem como base matemática as equações RANS que, por sua vez, derivam das clássicas equações de Navier-Stokes para um fluido contínuo, incompressível e viscoso [7].

A não-linearidade e a elevada natureza dispersiva das equações de Navier-Stokes introduz uma complexa modelação dos processos transformativos das ondas e das interações destas com as estruturas marítimas.

Admite-se que, para um escoamento turbulento, o campo de velocidades instantâneas,  $u_i$  e o campo de pressões,  $p$ , pode ser decompostos num termo médio ( $\bar{u}_i$  e  $\bar{p}$ ), e num outro termo relativo às flutuações turbulentas ( $u'_i$  e  $p'$ ):

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3-1)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (3-2)$$

onde  $i$  toma o valor de 1 e 2, consoante a direção horizontal ou vertical, respetivamente, para escoamentos bidimensionais.

Assim, pelas equações de Navier-Stokes, e assumindo que o fluido é incompressível, podem escrever-se as equações de RANS da seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3-3)$$

em que a equação da quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (3-4)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido (que para o caso de fluido incompressível toma um valor constante),  $g_i$  é a componente da aceleração gravítica,  $\bar{\tau}_{ij}$  é o tensor das tensões médias viscosas,  $t$  é o tempo e  $x_i$  e  $x_j$  são as direções horizontal e vertical.

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-5)$$

Na presença de meios porosos, o modelo IH-2VOF considera, como principal hipótese, que as equações RANS, juntamente com o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$ , permitem descrever o escoamento de um fluido num meio poroso.

Caso o meio poroso fosse modelado “grão a grão” em teoria, as equações RANS poderiam ser utilizadas para simular o fluxo do fluido entre grãos mas, obviamente, o processo seria muito moroso, pois exigiria uma malha excessivamente fina. Para tornar o processo mais simples e viável o modelo recorre à aplicação das equações VARANS (Volume-Averaged Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) [6].

As equações VARANS são obtidas pela integração das equações RANS num determinado volume de controlo no meio poroso. Nesse volume de controlo, um volume maior que a dimensão dos poros mas mais pequeno que o comprimento característico da escala do escoamento, o meio poroso é considerado como um meio contínuo, o que permite reduzir o tempo de cálculo (Figura 3.1).

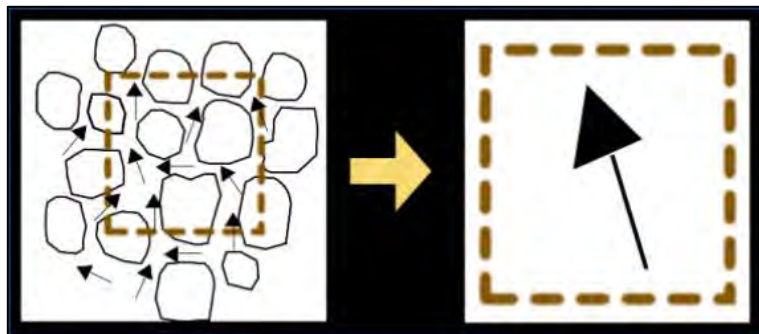


Figura 3.1: Média de volume realizada pelo VARANS através do RANS.

Para resolver as equações VARANS no modelo IH-2VOF é utilizada a relação de Forchheimer, generalizada para escoamentos não estacionários ou variáveis [8] e expressa pela seguinte equação [9]:

$$I = a u + b u |u| + c \frac{\partial u}{\partial t} + d u \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3-6)$$

onde  $I$  é o gradiente hidráulico,  $u$  a velocidade aparente do escoamento no meio poroso e  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são coeficientes dimensionais que podem ser determinados pelas seguintes equações:

$$a = \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{gD^2} \text{ (s/m)} \quad (3-7)$$

$$b = \beta \frac{1-n}{n^3} \frac{v}{gD^2} \text{ (s}^2\text{/m}^2\text{)} \quad (3-8)$$

$$c = \frac{1 + \gamma \frac{1-n}{n}}{ng} \text{ (s}^2\text{/m)} \quad (3-9)$$

$$d = \frac{1}{n^2 g} \text{ (m}^{-1}\text{/s}^{-2}\text{)} \quad (3-10)$$

onde  $n$ ,  $g$ ,  $v$  e  $D$  são a porosidade, a aceleração da gravidade, a viscosidade cinemática e uma dimensão característica do escoamento, isto é, a dimensão do material que constitui o meio poroso,  $D_{50}$ , respetivamente.

Os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  são coeficientes adimensionais de atrito linear e não-linear, pois estão associados às parcelas linear e não linear da relação de Forchheimer, respetivamente. Estes coeficientes dependem das características do meio poroso, como a granulometria, forma e orientação das partículas, entre outras, e como tal, devem ser calibrados com base em trabalhos experimentais [7]. O coeficiente de massa adicionada,  $\gamma$ , está associado à energia extra que é necessária para acelerar um determinado volume de água num meio poroso, sugerindo uma maior massa no mesmo volume. A bibliografia [9] recomenda a utilização do valor 0.34 para este coeficiente.



Uma descrição detalhada do modelo e das equações VARANS pode ser encontrada em [7].

### 3.2.2 Condições iniciais e de fronteira

Como condições iniciais o modelo considera que as velocidades são nulas e as pressões são iguais à pressão hidrostática.

No que diz respeito aos casos onde exista turbulência, as condições iniciais não podem ser nulas para o escoamento médio, uma vez que a turbulência, representada pelo tensor de Reynolds, é proporcional à energia cinética turbulenta,  $k$ . Aqui, se as condições iniciais forem nulas para  $k$ , não será gerada energia de turbulência durante a simulação.

Quanto às condições de fronteira, estas podem ser divididas em fronteiras sólidas e superfície livre.

O modelo considera dois tipos de condições nas fronteiras sólidas: uma sem deslizamento e a outra com deslizamento na direção paralela à superfície do sólido. No caso dos escoamentos turbulentos, o modelo permite ainda considerar um perfil logarítmico de velocidades tangenciais médias.

Quanto às fronteiras laterais, estas podem ser fechadas ou abertas. Quando fechada, comporta-se como uma fronteira sólida.

### 3.2.3 Identificação da superfície livre

Para localizar a superfície livre do fluido, o modelo identifica a sua posição através das variações de volume de água em cada célula [10].

O modelo permite identificar os diferentes tipos de células: vazia (empty, E), de superfície (surface, S) ou interior (interior, I), dependendo do valor da função do VOF (Volume of Fluid)  $F$ , definida por:

$$F = \frac{\rho_c}{\rho_f} \quad (3-11)$$

sendo:

$$\rho_c = \frac{\rho_f V_f}{V_f + V_a} \quad (3-12)$$

em que  $\rho_c$  é a densidade da “mistura” na célula,  $\rho_f$  é a densidade do fluido,  $V_f$  o volume de fluido da célula e  $V_a$  a quantidade de volume de ar existente no interior da célula.  $F$  toma os valores de 1, 0 ou um valor entre 0 e 1 respetivamente para células com escoamento do fluido (no caso aqui é a água), vazias ou de superfície (Figura 3.2).

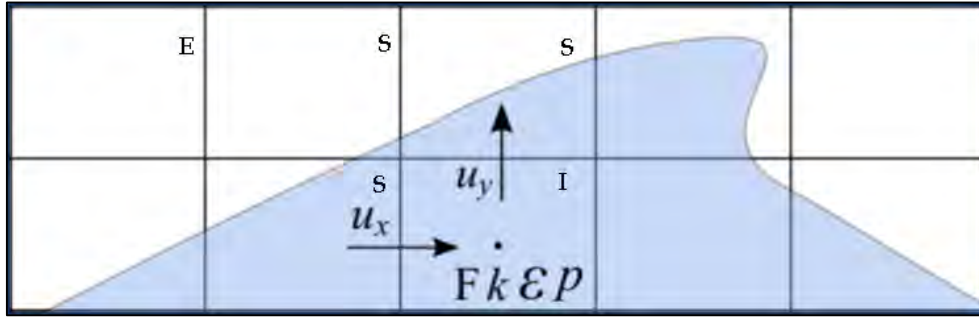


Figura 3.2: Esquema do domínio computacional numa célula, baseada na informação da função VOF [20].

A técnica VOF, introduz-se nas equações da conservação da massa da seguinte forma:

$$\rho_c(x, y, t) = F(x, y, t)\rho_f \quad (3-13)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}F) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}F) = 0 \quad (3-14)$$

em que  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$  são as componentes da velocidade média segundo a direção  $x$  e  $y$ , respetivamente.

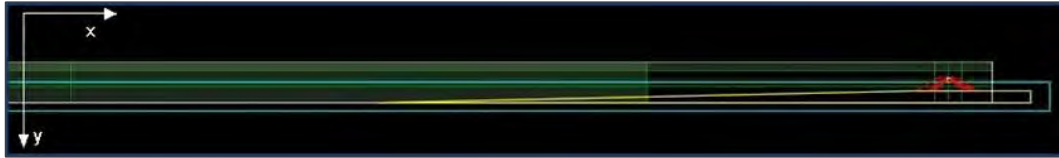
### 3.2.4 Domínio computacional

O domínio computacional do modelo IH-2VOF é bidimensional, com uma dimensão longitudinal na direção de propagação da agitação e uma dimensão vertical que engloba toda a coluna de água. Este domínio é constituído por uma malha de cálculo ortogonal, uniforme ou não que, por sua vez, é constituída por sub-malhas (ou “sub-zonas”) em cada eixo ordenado podendo assim conter células de tamanho variável.

Os eixos ortogonais definidos pelo modelo são o eixo horizontal  $x$ , orientado da esquerda para direita, e o eixo  $y$  da direção vertical, com orientação de cima para baixo (Figura 3.3).

Existe sempre a possibilidade de refinar a malha nas zonas de estudo de maior interesse, melhorando assim a qualidade dos resultados e diminuindo o tempo necessário para o cálculo.

Assim, cada célula da malha de cálculo é definida pelas suas dimensões  $dx$  e  $dy$  em relação aos eixos  $x$  e  $y$ , respetivamente.



*Figura 3.3: Representação dos eixos ortogonais e respetivas direções da malha computacional.*

Em cada célula da malha são determinadas as grandezas que caracterizam o escoamento. As quantidades escalares, como a pressão  $p$ , a energia cinética de turbulência,  $k$ , a taxa de dissipação  $\varepsilon$  e a fração de volume,  $F$ , da função VOF, que indica a presença de ar, água ou uma mistura de ambos, são definidas em relação ao centro das células; já as grandezas vetoriais, tais como a velocidade  $\bar{u}$  e  $\bar{v}$ , são definidas nas faces esquerda e superior da célula, respetivamente. (Figura 3.2).

### 3.3 Geração da onda

Relativamente à geração das ondas, em primeiro lugar, é necessário definir qual o tipo de onda a gerar (regular, irregular ou solitária). Por exemplo, no caso de ser pretendida uma onda regular, a utilizada nesta dissertação, é necessário definir as seguintes características:

- Altura de onda,  $H$ ;
- Período de onda,  $T$ ;
- Profundidade na zona de geração,  $h$ ;
- Duração da série,  $tmáx$ ;
- Frequência de amostragem,  $fs$ ;
- Fase (valor base de  $3\pi/2$ );
- Teoria de onda.

O modelo IH-2VOF possui duas formas de gerar a onda no domínio: o batedor estático e o batedor dinâmico [11]. No caso do batedor estático definem-se, na zona de geração, a série temporal da superfície livre ( $\eta$ ), e a série temporal das duas componentes, horizontal e vertical, da velocidade em cada um dos pontos da fronteira.

O batedor dinâmico replica um batedor existente no laboratório, provocando uma ação dinâmica semelhante à dos batedores do tipo pistão.

No presente trabalho foram utilizados tanto o método do batedor estático, como o método do batedor dinâmico.

O método do batedor estático consiste em introduzir na fronteira do domínio de cálculo o campo de velocidades e a posição da superfície livre, gerando, assim, um sistema de ondas unidirecional.

No caso do batedor dinâmico, caracterizado por um batedor do tipo pistão, é necessário, como para o caso do batedor estático, introduzir o valor da elevação de superfície livre bem como a frequência da senoide, definida pela elevação dessa superfície livre. Admite-se que o sistema movimento do batedor – elevação de superfície livre é linear e invariante no tempo.

### **3.4 Geração da malha**

A malha é gerada por um programa executado em paralelo com o modelo numérico. Através deste programa, designado CORAL [6], é definida a geometria do caso a estudar, a malha e as características dos meios porosos e dos obstáculos. Na Figura 3.4 apresenta-se um exemplo de janela do programa CORAL, onde se podem distinguir quatro zonas:

- Zona 1, referente à representação gráfica da geometria e da malha gerada;
- Zona 2, que permite alterar a visualização, através do “*zoom*” e outras opções de visualização;
- Zona 3, onde se define a dimensão do domínio numérico e as características da malha;
- Zona 4, onde se define a geometria, incluindo os meios porosos e os obstáculos, e ainda o nível da água em repouso.

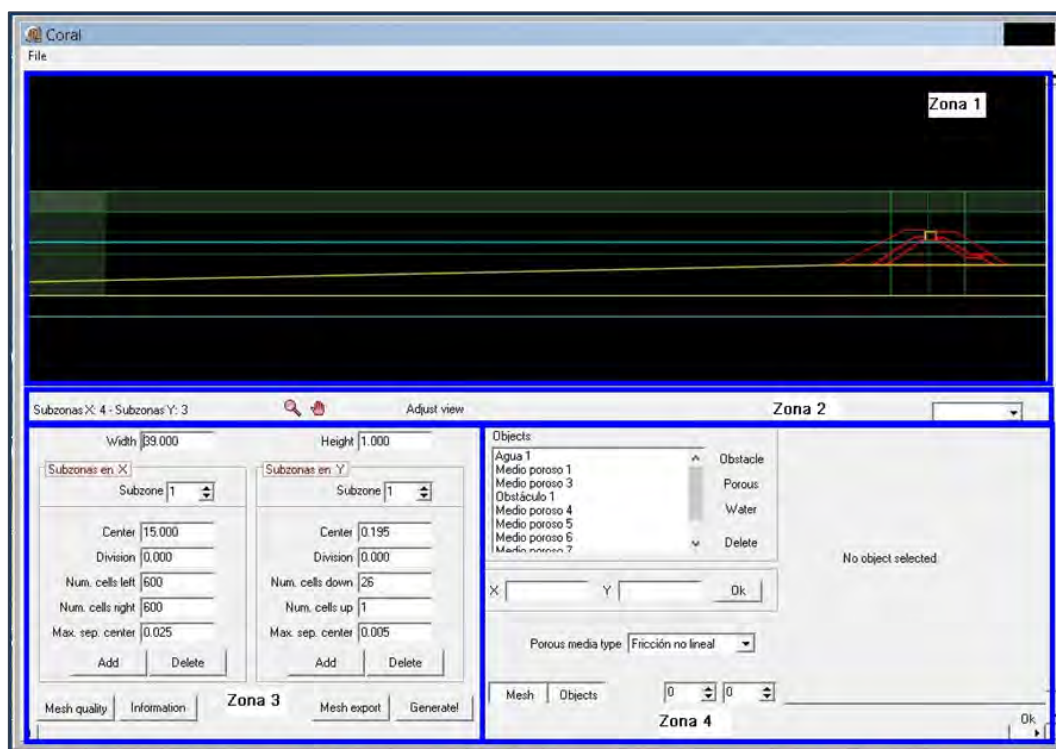


Figura 3.4: Exemplo da janela de visualização do software CORAL, para a criação da malha.

A malha a ser gerada depende do caso de estudo, nomeadamente da sua geometria. Não menos importante, aquando da geração da malha deve ser tida em consideração a capacidade do computador disponível.

Para a geração da malha, o primeiro passo é definir as dimensões do domínio, isto é, a sua largura e altura. Utilizando o programa CORAL [6], inserem-se na zona 3 (ver Figura 3.4) os valores nas caixas correspondentes: o número de zonas, o número de células em cada zona bem como a respetiva dimensão mínima e o ponto de convergência (o centro) da sub-zona. A quantidade de células numa determinada sub-zona é especificada pelo número de células presentes à esquerda e à direita do ponto de convergência. As células que se encontram imediatamente à esquerda ou à direita do ponto de convergência têm uma dimensão igual à dimensão mínima estipulada. A dimensão das restantes células variará, numa expansão quadrática até aos limites, esquerdo e direito, da sub-zona, de acordo com o número de células pretendido. Definidas todas estas informações seleciona-se o botão “Generate!” e o domínio é definido.

Após a definição do domínio é necessário definir a geometria, recorrendo à zona 4 da interface do CORAL. Nesta zona é possível definir a geometria dos meios porosos, dos meios impermeáveis ou obstáculos e o nível da água em repouso através de polígonos unidos por pontos com as coordenadas desejadas.

Nos obstáculos e na superfície livre é apenas necessário definir a geometria, enquanto nos meios porosos é necessário definir, para além da geometria, cinco parâmetros:

- Porosidade ( $n$ ): definida pela razão entre o volume de poros e o volume total de uma amostra;
- Coeficiente de atrito linear ( $\alpha$ ): Coeficiente empírico que deve ser calibrado;
- Coeficiente de atrito não linear ( $\beta$ ): Coeficiente empírico que deve ser calibrado;
- Coeficiente de massa adicionada ( $\gamma$ ): Coeficiente empírico que deve ser calibrado;
- Diâmetro nominal ( $D_{50}$ ): Diâmetro característico do material que constitui o meio.

Para a escolha dos valores para os coeficientes de atrito linear e não linear, os valores sugeridos por diversos autores, dependendo também das condições dos ensaios, são apresentados na Tabela 3.1.

O CORAL permite criar malhas ortogonais uniformes ou não, conforme o que o utilizador pretenda. É aconselhado utilizar malhas não uniformes quando se pretende reduzir o número total de células e, ao mesmo tempo, manter a precisão desejada na zona de análise de maior importância.

Para a construção da malha de cálculo são feitas algumas recomendações no manual do modelo numérico [6], que se destinam a evitar e minimizar erros, tais como:

- A relação entre a largura e altura das células ( $d_x/d_y$ ) deve estar compreendida entre 1 e 5;
- O valor de  $d_y$  deve ser  $d_y \approx H/10$ ;
- Devem ser evitadas diferenças significativas de discretização entre sub-malhas e dentro de cada sub-malha. Como regra geral as dimensões de células adjacentes não devem diferir mais do que 10 a 20% em ambas as direções;
- O domínio não deve ser representado verticalmente por mais de 250 células.

Tabela 3.1: Valores recomendados para  $\alpha$  e  $\beta$  (adaptado de [12]).

Autor	Tipo/condição de ensaio	$\alpha$	$\beta$
Vidal et al. (1988) (análise experimental)	Transmissão de onda solitária através de um quebra-mar vertical poroso	1100	0.81
Van Gent (1995) (análise experimental)	Escoamento estacionário e oscilatório através de material granular de diferentes morfologias. 0.0202m <D50 <0.061m	1000	1.1
Liu et al. (2000) (modelo RANS)	Escoamento estacionário através de um quebra-mar poroso.	200	1.1
Lynett et al. (2000) (modelo Boussinesq)	Interação de ondas com reduzida dispersão e reduzida não linearidade com diferentes tipologias de quebra-mares porosos.	1100-1800	0.55-1.1
Lara (2002) (modelo RANS)	Rotura sobre o leito poroso. 0.019m <D50 <0.039m	200	0.2
Hsu et al. (2002) (modelo RANS)	Interação de ondas regulares num quebra-mar de talude.	200	1.1
García (2005) (modelo RANS)	Interação de ondas regulares e irregulares em quebra-mares destacados porosos.	1000	0.8-1.2

De forma a evitar o fenómeno designado por falsa rebentação (Figura 3.5), devem ser consideradas ainda as seguintes condições:

- Devem ser consideradas pelo menos 10 células segundo a direção y, por altura de onda;
- Devem ser consideradas pelo menos 100 células na direção x, por comprimento de onda considerado;
- A largura de uma célula não deve ser superior a 2.5 vezes a sua altura,  $dx < 2.5dy$ ;

- Numa sub-malha variável a diferença de dimensões entre células adjacentes tem que ser menor do que 5%. Esta condição é satisfeita quando  $d_x^2 < 0.05cm$  e  $d_y^2 < 0.05cm$ .

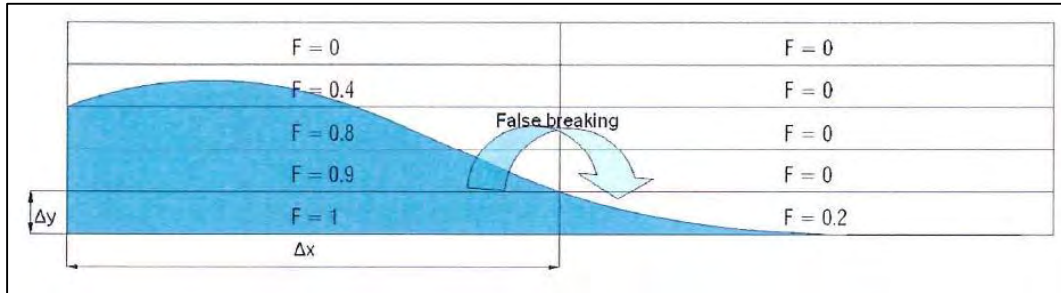


Figura 3.5: Fenómeno de falsa rebentação [6].

A qualidade da malha pode ser verificada no próprio *software*, conforme se ilustra na Figura 3.6, através da análise de dois gráficos, um para cada um dos eixos ortogonais, que representam a dimensão das células e sua variação ao longo do respetivo eixo. Caso a última condição descrita anteriormente não seja respeitada, aparece no gráfico uma linha vermelha a indicar que existem irregularidades na dimensão da malha.

Há ainda que ter em atenção o nível médio da água. Este nível, a fim de evitar posteriores erros de cálculo, deve coincidir com um ponto da malha.

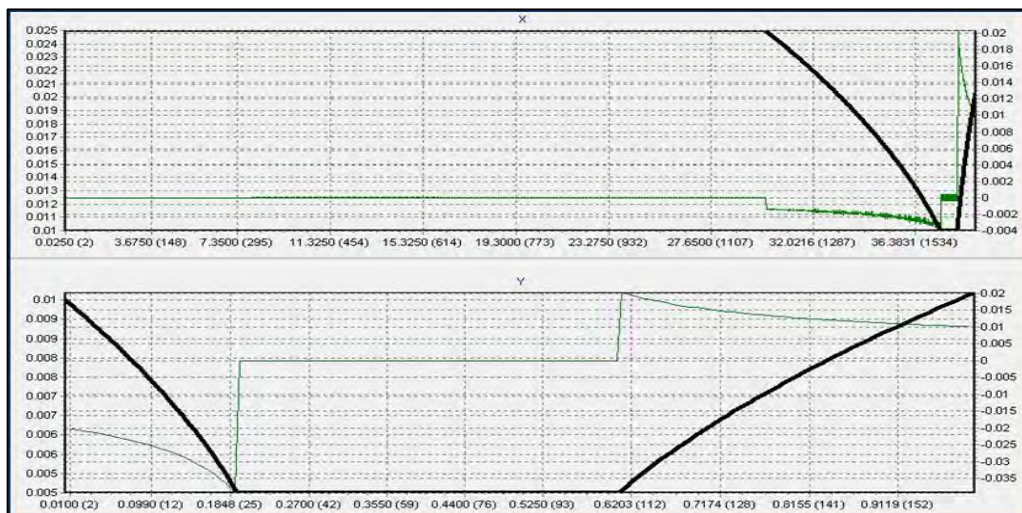


Figura 3.6: Verificação da qualidade da malha.

Na Figura 3.7 apresenta-se uma parte da malha com diferentes zonas, cujas dimensões das células na direção horizontal são variáveis.



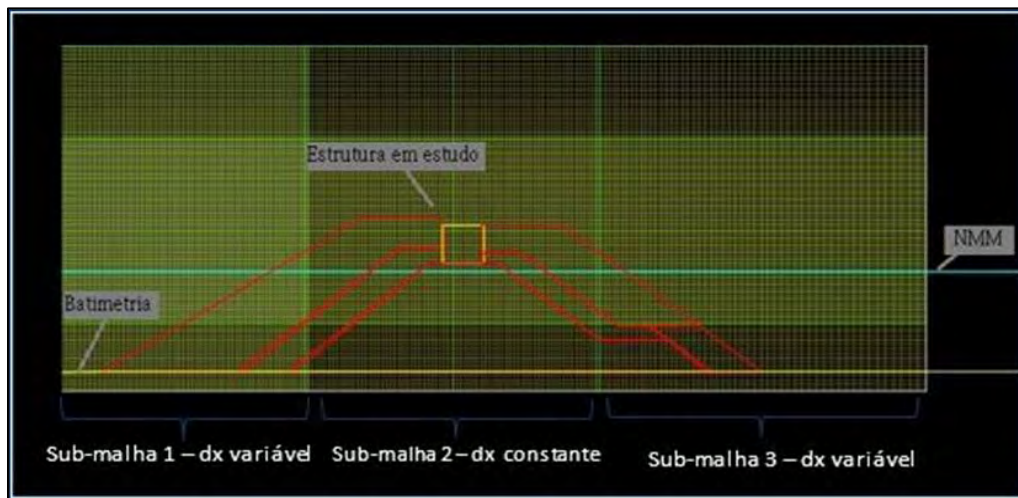


Figura 3.7: Exemplo de uma malha não uniforme modelada no CORAL.

### 3.5 Interface, dados e resultados

Para a realização deste trabalho, foi utilizado o modelo IH-2VOF, já apresentado anteriormente, que tem sido desenvolvido e atualizado pela Universidade de Cantábria, Espanha [6]. Este modelo dispõe de uma interface, desenvolvida em MatLab. A versão do IH-2VOF utilizada nesta dissertação é das mais recentes e, do ponto de vista da introdução de dados de entrada e geração de ficheiros de dados do programa, é bastante “user friendly”.

Através da janela de interface, constituída por quatro zonas, consegue-se facilmente importar a malha criada a partir do CORAL e introduzir o tipo de onda a gerar (linear, Stokes II, etc.), as condições de agitação (altura de onda, período), o tipo de batedor (dinâmico ou estático) e as condições de fronteira.

Na Figura 3.8, apresenta-se um exemplo da interface do programa.

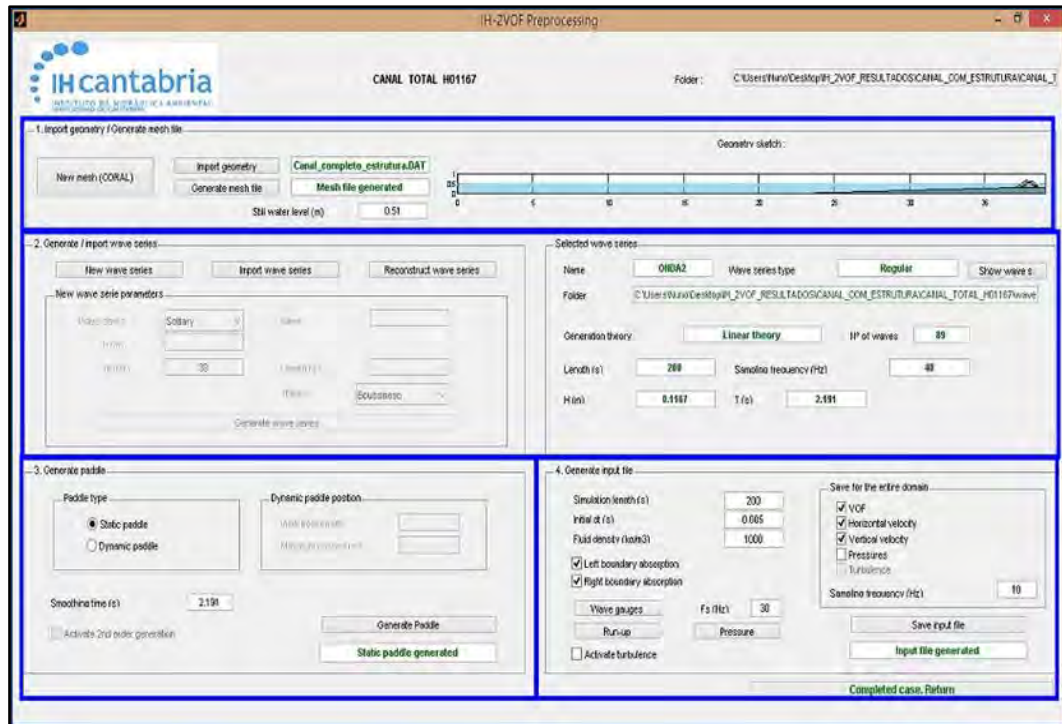


Figura 3.8: Janela de interface do IH-2VOF.

### 3.6 Cálculo do galgamento

A determinação e análise do caudal médio que transpõe o coroamento da estrutura, por outras palavras, o caudal médio galgado, é o principal objetivo da presente dissertação.

Para o cálculo deste parâmetro através dos resultados do modelo, é necessário conhecer a velocidade do escoamento nos pontos da malha da secção transversal onde se pretende efetuar o cálculo, isto é, sobre o coroamento da estrutura, num determinado intervalo de tempo ( $\Delta t$ ).

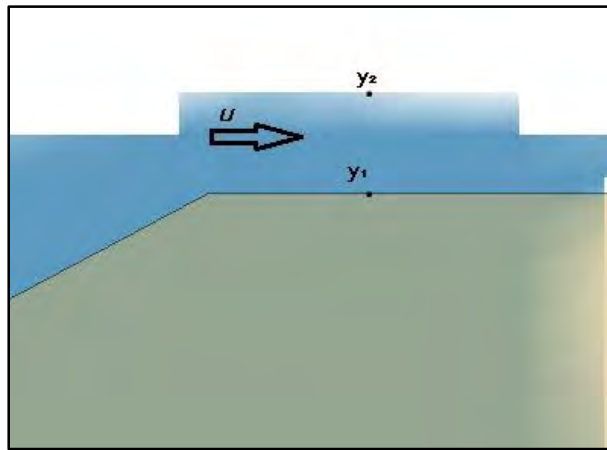
Conhecendo a velocidade de escoamento do fluido (neste caso a água),  $u(x,y,t)$ , ao longo do tempo, integra-se a velocidade na secção por forma a obter o caudal instantâneo nessa secção. Posteriormente realiza-se uma integração do caudal instantâneo no tempo para o qual se pretende determinar o galgamento. Dividindo o resultado das duas integrações anteriores pelo intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) em que se pretende calcular o galgamento, obtém-se finalmente o caudal médio galgado.

Assim, o caudal médio galgado pode ser descrito pela equação:

$$Q = \frac{1}{\Delta t} \int \int_{y_1}^{y_2} u(x, y, t) dy dt \quad (3-15)$$

onde  $y_1$  e  $y_2$  são os limites inferior e superior da lâmina de água que galga uma determinada secção de coroamento da estrutura num determinado intervalo de tempo e  $u$  a respetiva velocidade (Figura 3.9).

Nas recentes versões do modelo numérico IH-2VOF, o caudal médio galgado é um dos resultados que se obtém diretamente através do menu “postprocessing”, isto é, o próprio modelo determina os valores de galgamento tendo por base a formulação matemática anteriormente descrita.



*Figura 3.9: Determinação do galgamento – esquema representativo do processo de cálculo.*



## CAPÍTULO IV

### O caso de estudo

#### 4.1 Considerações gerais

O caso de estudo da presente dissertação é o quebra-mar Poente do Porto de Pesca de Albufeira, no Algarve. Este trabalho insere-se no âmbito do projeto “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) para aplicações a estruturas costeiras”, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia e realizado pelo LNEC e pelo Centro de Investigação Marinha e Ambiental da Universidade do Algarve (CIMA). O objectivo do projeto foi desenvolver ferramentas de cálculo e obter dados, quer de ensaios em modelo físico quer de campo, sobre o galgamento neste quebra-mar.

No âmbito deste trabalho foram realizados ensaios em modelo físico à escala 1:30, que foram usados nesta dissertação para aplicação do modelo numérico IH-2VOF e que se descrevem nesta secção.

#### 4.2 O Porto de pesca de Albufeira

O Porto de Pesca de Albufeira é um porto relativamente novo, cuja construção teve início em meados de 1999 e foi terminada em 2002. É dotado de duas obras de proteção marítima, quebra-mar Poente e o quebra-mar Nascente, de 275m e 250m de comprimento respetivamente, ver Figura 4.1.



Figura 4.1: Vista aérea das estruturas de proteção marítima do porto de pesca de Albufeira, com destaque do quebra-mar Poente (Imagem Google Earth).

O quebra-mar Poente, objeto deste estudo, desempenha um papel importante, visto ser a única proteção do porto contra a agitação marítima vinda de Sudoeste. Estruturalmente, este quebra-mar possui 5 perfis-tipo distintos.

A secção em estudo, assinalada na Figura 4.2, caracteriza-se por um talude exterior com um declive de 3:1.6 e desenvolve-se entre a cota +7.0m (ZH) e uma cota que dista do fundo natural de 0.5m (Figura 4.3), encontrando-se fundeada à cota -3.0m (ZH). O talude exterior é composto por duas camadas de blocos de 90 a 120kN, tendo como filtros duas camadas de enrocamentos de 10 a 30kN.

O talude interior, com um declive de 3:2, desenvolve-se entre a cota +6.5m (ZH) e uma cota que dista do fundo natural de 0.5 m. Está igualmente protegido por enrocamentos de 90 a 120kN entre o coroamento e o +0.00m (ZH) e por enrocamento de 10 a 30kN entre o +0.00m (ZH) e uma cota que dista do fundo natural de 0.5 m. A fundação do talude processa-se sobre um núcleo de TOT. Quer a berma de coroamento exterior (à cota +7.0m (ZH)), quer a berma de coroamento interior (à cota +6.5m (ZH)), têm cerca de 5.9m de largura. Na zona central do coroamento desenvolve-se um passadiço de betão armado com 3.0m de largura, com coroamento à cota +6.5m (ZH) e fundação à cota +4.0m (ZH), [13].





Figura 4.2: Imagem aérea do Porto de Pesca de Albufeira (B) Localização da secção transversal onde inciduiu o estudo [13].

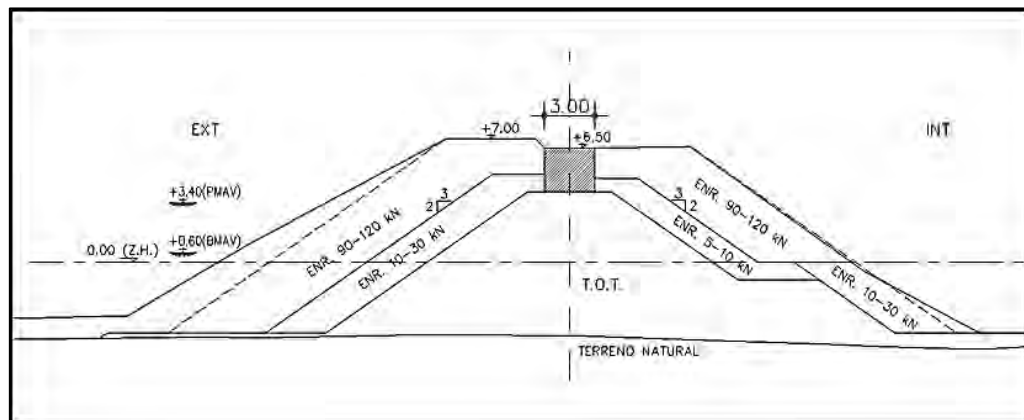


Figura 4.3: Secção em estudo.

### 4.3 Condições de agitação local

As condições de agitação marítima no local do quebra-mar em estudo são semelhantes às de quase toda a costa Sul do país, caracterizando-se por alturas de onda inferiores a 1m durante cerca de 60% do ano e com valores máximos anuais de cerca de 4m [14].

As agitações que apresentam maior relevância para o galgamento, proveem das direções Sudoeste e Sudeste. Em comparação com as condições de agitação na costa ocidental são condições menos energéticas.

É de Sudoeste que chegam os maiores temporais ocorrentes na costa Sul, proveniente das situações meteorológicas que se originam na costa ocidental do país mar de Sudoeste e Oeste. Esta agitação é caracterizada por ondas com 2 a 3 m de altura e períodos de 7 a 8 s.

O mar de Sudeste, conhecido por “Mar de Levante”, associado aos ventos provenientes de Este e Sudeste do Algarve, especialmente no Estreito de Gibraltar, traz ondas que rondam cerca de 2m de altura e períodos de 6s. Raramente atingem 4m, mas por vezes podem surgir ondulações de Sudeste com alturas de 2.5m ou até mais, provenientes do Estreito de Gibraltar.

#### **4.4 Modelação física**

##### **4.4.1 Teoria da semelhança e efeitos de escala**

No dimensionamento de estruturas costeiras ou estruturas portuárias, são normalmente utilizados métodos empíricos e analíticos na análise do seu comportamento hidráulico e estrutural. Estes métodos foram desenvolvidos para determinado tipo de estrutura, com características particulares de material constituinte e para condições de agitação também específicas.

Em casos relativamente simples, em que a estrutura e as condições de agitação a que está sujeita, na realidade, não variam muito das condições para que os métodos foram desenvolvidos, estes métodos poderão ser suficientes para o dimensionamento.

Contudo, em casos de maior complexidade ou que sejam objetos de estudo com um elevado grau de importância, o nível de incerteza é superior e torna-se necessário recorrer a modelos reduzidos e métodos numéricos.

A utilização de modelos físicos é, dentro das várias ferramentas, uma das mais solicitadas na fase final do projeto. O modelo físico pretende simular, numa escala reduzida e de uma forma simplificada, os fenómenos que ocorrem ou que tenham ocorrido na realidade.

O estudo de um problema com base em modelos físicos reduzidos requer a aplicação de leis de semelhança, de modo a transformar as ações reais em ações equivalentes a aplicar ao modelo e a extrapolar os resultados experimentais obtidos para a escala real, ou seja, o modelo e o protótipo devem comportar-se de forma tão semelhante quanto possível, pelo menos no que se refere aos principais fenómenos a reproduzir.



Para se verificar semelhança mecânica hidráulica é necessário que sejam semelhantes a geometria, as solicitações e os seus efeitos no modelo e no protótipo, ou seja, é necessário que se verifiquem semelhanças geométrica, cinemática e dinâmica [15].

O modelo e o protótipo são geometricamente semelhantes quando a razão de distâncias entre quaisquer pontos homólogos do modelo e do protótipo tem o mesmo valor à escala geométrica a que o modelo está construído.

O modelo e o protótipo são cinematicamente semelhantes quando a razão entre intervalos de tempo em que partículas do modelo e do protótipo se deslocam entre pontos homólogos tem o mesmo valor à escala geométrica a que o modelo está construído.

O modelo e o protótipo são dinamicamente semelhantes quando a razão entre as forças atuantes em partículas homólogas do modelo e do protótipo tem o mesmo valor à escala das forças. Quer isto dizer que partículas homólogas do modelo e do protótipo são sujeitas a forças com a mesma direção e sentido, mas com módulos proporcionais.

A correta reprodução de todos os fenómenos de interação entre onda e estrutura à escala reduzida é praticamente impossível. Assim, é inevitável o aparecimento de alguns erros denominados efeitos de escala. Os efeitos de escala resultam, assim, da incorreta reprodução no modelo dos fenómenos de interação onda-estrutura do protótipo.

No caso do galgamento de ondas sobre um quebra-mar, que é o caso de estudo desta dissertação, a semelhança dinâmica é verificada quando existe igualdade do número de Froude,  $Fr$ , no modelo e no protótipo, o que se designa por semelhança de Froude e que é descrita por :

$$\lambda Fr = \frac{F_{r,modelo}}{F_{r,protótipo}} = 1 \quad (4-1)$$

onde  $\lambda$  é a escala,  $Fr$  é o número de Froude,  $F_{r,modelo}$  e  $F_{r,protótipo}$  são o número de Froude do modelo e do protótipo, respetivamente (Pita, 1984).

O número de Froude é dado por:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}} \quad (4-2)$$

sendo  $v$  a velocidade de escoamento,  $g$  a aceleração da gravidade e  $l$  um comprimento característico.

Com base na semelhança de Froude é possível obter as escalas de diferentes parâmetros, com base numa escala geométrica,  $N_L$ , isto é, na razão entre comprimentos homólogos no protótipo e no modelo.

A Tabela 4.1 apresenta, de forma resumida, escalas de alguns parâmetros segundo a semelhança de Froude, considerando uma escala geométrica  $N_L$ .

*Tabela 4.1: Métodos de escala segundo a Semelhança de Froude (adaptado de [16]).*

Parâmetro	Unidade	Escala
Comprimento	(m)	$N_L$
Área	(m <sup>2</sup> )	$N_L^2$
Tempo	(s)	$\sqrt{N_L}$
Caudal	(m <sup>3</sup> /s/m)	$N_L^{1.5}$

#### 4.4.2 Configuração do modelo físico

Tal como referido anteriormente, nesta dissertação utilizam-se resultados de ensaios em modelo físico realizados no âmbito do projeto SPACE.

O modelo físico da secção transversal do quebra-mar Poente do Porto de Albufeira foi realizado à escala 1:30 no canal de ondas irregulares 1 (COI 1), no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Figura 4.4, cujas dimensões são: 49.40m de comprimento, 1.60 de largura e 1.20m de altura.



Figura 4.4: Canal de Ondas Irregular 1, situado no Departamento de Hidráulica e Ambiente [24].

No canal foi construído um fundo representativo da batimetria na zona da secção do quebra-mar analisada, constituído por uma zona plana com 23.04 m de comprimento, seguido de uma rampa de 13.96 m até ao pé da estrutura, com uma inclinação de aproximadamente 2.1%. O pé da estrutura ficou assim situado a 37.00m da zona de geração de ondas, constituída por um batedor do tipo pistão [15].

O nível da água em repouso correspondia a uma profundidade de água junto ao batedor de 0.51m, o que equivale a ter uma profundidade de 0.217m junto ao pé da estrutura. Estas condições são representativas, no protótipo, do nível de maré de +3.50m (ZH), que corresponde a preia-mar, nível mais desfavorável no que se refere ao galgamento.

A Figura 4.5 mostra o esquema do perfil longitudinal do canal em todo o seu comprimento, com as dimensões acima mencionadas.

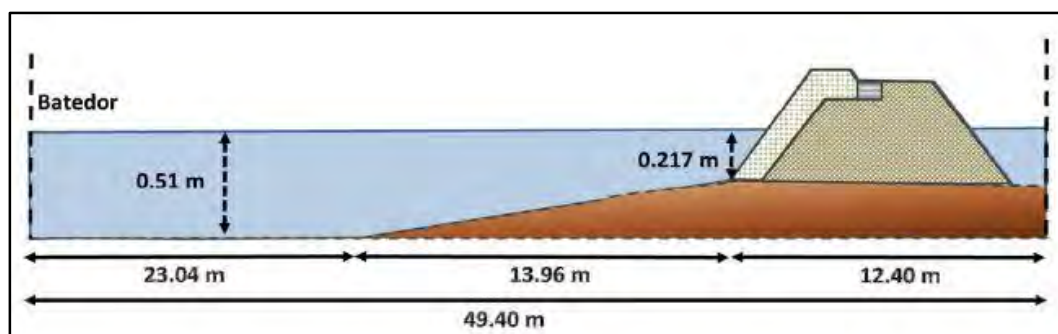


Figura 4.5: Representação esquemática do perfil longitudinal do canal de ondas. [16]

Quanto à estrutura, o peso dos blocos dos mantos constituintes e as dimensões de todos os elementos foram escalados de forma a representar da melhor maneira a secção do quebra-mar Oeste do Porto de Albufeira em estudo, cujas características foram apresentadas anteriormente.

Para a medição das series temporais da superfície livre, ao longo do canal foram instaladas sondas de elevação de superfície. Mais precisamente, foram colocadas 10 sondas, cuja disposição e localização estão indicadas na Figura 4.6 e na Tabela 4.2, respetivamente. A origem do referencial  $Oxz$  foi considerada no pé da estrutura. A sonda G2 localiza-se no início da rampa que constitui o fundo. A sua colocação teve o intuito de controlar a onda que era gerada pelo batedor. As sondas G3 a G7 permitiram obter as séries temporais da elevação da superfície livre a barlar da estrutura. As sondas G8 a G10 estão inseridas no interior da estrutura. Através delas, foram medidos os valores de nível de água no interior da estrutura porosa. Por fim a sonda G11 foi colocada no coroamento da estrutura, numa zona impermeável, para a medição do nível da lâmina de água que passa o passadiço central do quebra-mar.

O volume de água que transpunha o coroamento da estrutura era encaminhado para um reservatório, a partir da qual era determinado o volume galgado e, a partir deste e do tempo de ensaio, calculava-se o caudal médio galgado.

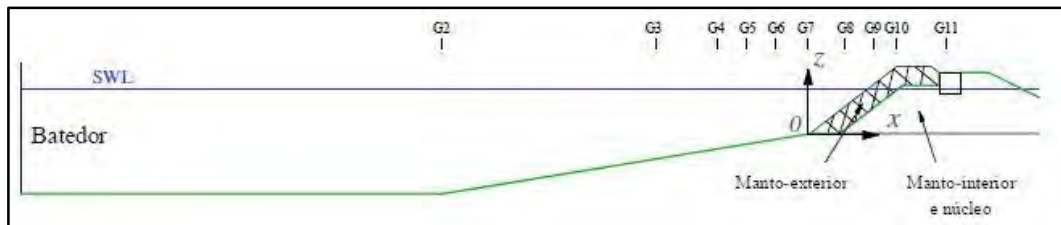


Figura 4.6: Perfil do canal e quebra-mar - Posição das sondas. [16]

Tabela 4.2: Posição das sondas ao longo do canal

Sonda	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	G9	G10	G11
Posição (m)	-13.96	-3.79	-2.53	-2.025	-1.23	-0.055	0.297	0.58	0.745	0.875

No projeto SPACE realizaram-se ensaios com condições de agitação regular que contemplaram diferentes valores de alturas (H) e períodos de onda (T). Os valores de altura de onda variavam de 2.5m a 5.5m de altura mantendo, na maioria dos casos, um período de 12s, valores de protótipo.

Em outros casos, a altura de onda manteve-se constante e variou-se o valor do período. A profundidade, junto da zona de geração, foi mantida constante em todos os ensaios e igual a 0.51m.

Na presente dissertação, dado que um dos objetivos é o de comparar os resultados do modelo IH-2VOF com os obtidos para diferentes características dos mantos, tal como foi aplicado no modelo SPHyCE (o modelo em estudo no projeto SPACE), selecionaram-se apenas três casos de agitação: um primeiro caso que serviu de teste e calibração de todo o modelo IH-2VOF correspondente à onda de altura igual a 3.5m com um período de 12s (valores de protótipo); e outros dois casos que correspondem aos casos estudados com o modelo SPHyCE [16], com ondas de 4.0m e de 4.5m de altura e períodos de 12s (valores de protótipo).

Para as condições de agitação que são alvo de estudo nesta dissertação, apresentam-se na Tabela 4.3 os valores de alturas de onda obtidos em cada sonda, em valores do modelo.

*Tabela 4.3: Alturas de onda em cada sonda nos ensaios realizados em modelo físico com  $T=12s$ .*

Sondas		H (m)		
	x (m)	H=3.5	H=4.0	H=4.5
G2	-13.96	0.080	0.084	0.107
G3	-3.79	0.072	0.078	0.080
G4	-2.53	0.111	0.061	0.145
G5	-2.025	0.083	0.085	0.119
G6	-1.23	0.157	0.176	0.198
G7	-0.055	0.072	0.082	0.093
G8	0.297	0.095	0.107	0.132
G9	0.58	0.120	0.130	0.140
G10	0.745	0.080	0.087	0.098
G11	0.875	0.000	0.002	0.036



## CAPÍTULO V

# Análise da influência do sistema de geração de ondas e do acoplamento de malhas nos resultados do modelo

### 5.1 Considerações gerais

Neste capítulo apresenta-se a análise efetuada sobre a influência do acoplamento de malhas e da forma de geração das ondas nos resultados do modelo.

A técnica de acoplamento permite estudar zonas relativamente extensas, do largo até às estruturas, utilizando diferentes domínios de cálculo, cada um deles dedicado à modelação de uma zona específica, em função das suas características, com o intuito de reduzir o tempo de cálculo computacional garantindo a precisão dos resultados. No presente caso de estudo o canal é constituído por duas partes distintas: uma primeira, onde apenas ocorrem fenómenos de propagação de ondas e onde a malha não necessita de grande refinamento; uma segunda, que engloba a estrutura e onde o refinamento deve ser maior. Assim, a aplicação desta técnica é desejável neste caso de forma a reduzir o tempo de cálculo.

Na secção de acoplamento a agitação pode ser gerada quer por um batedor dinâmico, semelhante aos existentes nos canais de laboratório, quer por um batedor estático. As diferenças introduzidas pela forma de geração de ondas podem ser significativas e devem ser analisadas.

Para analisar a influência quer do acoplamento quer da forma de geração das ondas, o modelo foi aplicado às condições de agitação e geometria da estrutura apresentadas na secção anterior. Simularam-se diferentes características geométricas do domínio computacional progressivamente mais complexas:

- a) fundo plano;
- b) fundo inclinado;
- c) fundo inclinado e secção transversal do quebra-mar em estudo.

O modelo foi executado para um domínio contendo toda a área de estudo (canal total) e para um domínio mais reduzido que inclui a estrutura (canal parcial), Figura 5.1. No canal parcial as ondas foram geradas quer recorrendo a um batedor estático quer a um batedor dinâmico.

A posição da secção de acoplamento coincide com a sonda G5, que está posicionada a 2.03m a barlamar do pé da estrutura.

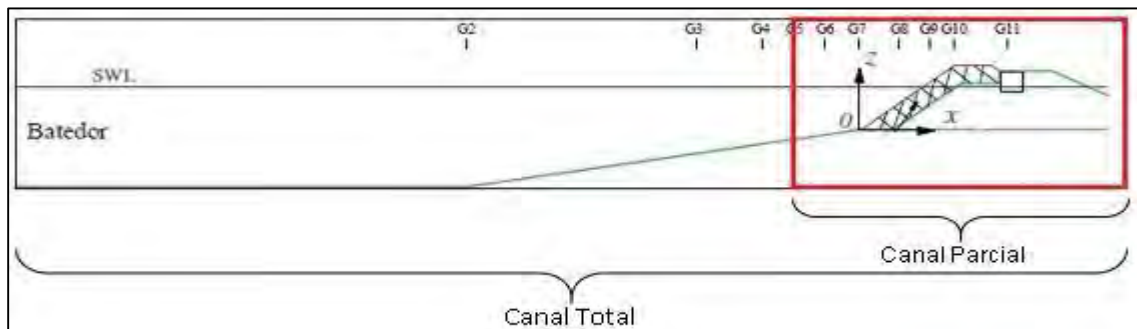


Figura 5.1: Canal Total e Canal Parcial

## 5.2 Malha do modelo numérico

Para a aplicação do modelo e como já foi referido, é necessário construir ou definir a malha de elementos finitos.

Para a construção da malha recorreu-se ao interface gráfico CORAL, que permite gerar todo o tipo de geometrias, obstáculos, meios porosos, bem como a condição inicial de superfície livre do fluido.

A malha foi definida tendo em conta as recomendações apresentadas no manual do IH-2VOF que foram, também, mencionadas no subcapítulo 3.4.

Procurou-se que a malha representasse o melhor possível a estrutura do modelo físico, de forma a permitir uma melhor comparação dos resultados obtidos do modelo físico e numérico. Deste modo, para a situação representativa de todo o canal total (39.0m), obteve-se uma malha composta por quatro subzonas segundo a direção ortogonal  $x$  e três subzonas segundo a direção  $y$ .

No total, a malha contém 1753 células segundo a direção  $x$  e 161 células segundo a direção  $y$ , dispostas por várias zonas, em ambas as direções, conforme se apresenta na Tabela 5.1.



Tabela 5.1: Esquema representativo da malha para o canal total.

Zonas		$x$	Zona 1x	Zona 2x	Zona 3x	Zona 4x
$y$			$0.00 \leq x \leq 30.00$	$30.00 \leq x \leq 37.50$	$37.50 \leq x \leq 38.20$	$38.20 \leq x \leq 39.00$
Zona 1y	$0.20 \geq y \geq 0.00$		$dx = 0.025$ $0.01 \geq dy \geq 0.005$	$0.025 \geq dx \geq 0.01$ $0.01 \geq dy \geq 0.005$	$dx = 0.01$ $0.01 \geq dy \geq 0.005$	$0.01 \leq dx \leq 0.02$ $0.01 \geq dy \geq 0.005$
Zona 2y	$0.60 \geq y \geq 0.20$		$dx = 0.025$ $dy = 0.005$	$0.025 \geq dx \geq 0.01$ $dy = 0.005$	$dx = 0.01$ $dy = 0.005$	$0.01 \leq dx \leq 0.02$ $dy = 0.005$
Zona 3y	$1.00 \geq y \geq 0.60$		$dx = 0.025$ $0.005 \leq dy \leq 0.01$	$0.025 \geq dx \geq 0.01$ $0.005 \leq dy \leq 0.01$	$dx = 0.01$ $0.005 \leq dy \leq 0.01$	$0.01 \leq dx \leq 0.02$ $0.005 \leq dy \leq 0.01$

### 5.3 Canal com fundo horizontal

O primeiro caso que foi analisado é o caso mais simples onde, no domínio de cálculo, não existem irregularidades na batimetria, ou seja, o fundo é plano e não é considerada a presença de qualquer estrutura.

Este caso foi feito com o intuito principal de entender a metodologia do processo de acoplamento de malhas com o modelo matemático utilizado (IH-2VOF), bem como, através da análise dos resultados, perceber quais as diferenças entre a geração da agitação resultante de ação de um batedor estático e de um batedor dinâmico.

Para o canal total, a condição de agitação considerada neste teste é a indicada na Tabela 5.2: uma onda regular com 0.1167m de altura e um período de 2.191s (valores à escala 1:30) gerada por um batedor estático que se encontra na fronteira esquerda do canal, conforme ilustrado na Figura 5.2.

Tabela 5.2: Condição de agitação para ensaio em canal com fundo horizontal.

Protótipo		Escala 1:30	
H (m)	T (s)	H (m)	T (s)
3.5	12	0.1167	2.191

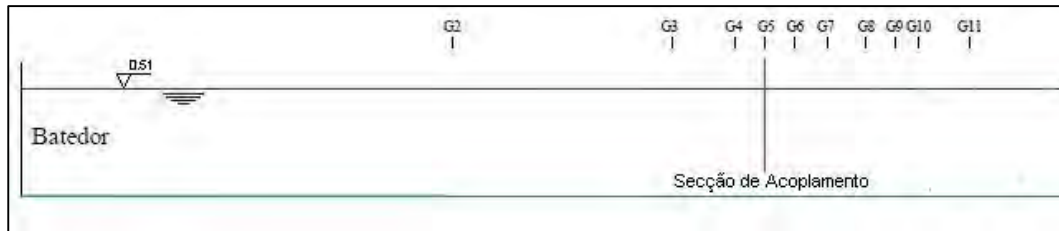


Figura 5.2: Representação esquemática do perfil do canal total com fundo horizontal plano.

O nível da água em repouso é de 0.51m, valor este que se mantém em toda a longitude do canal.

Como foi mencionado anteriormente, o canal parcial é uma parte do canal total que se inicia na posição da sonda G5 (ver Figura 5.2), definida como secção de acoplamento, onde se localiza a zona de geração, e termina onde termina o canal total.

O canal parcial com batedor estático apresenta uma extensão de 4.024m e o batedor encontra-se na fronteira esquerda do domínio, como se pode ver na Figura 5.3.

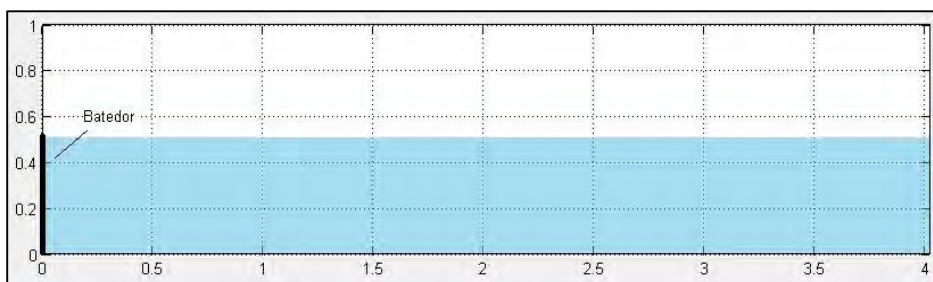


Figura 5.3: Canal parcial estático de fundo plano.

No caso do canal parcial dinâmico o seu comprimento é de 5.024m. A justificação para este valor, 1.0 m superior ao do caso do batedor estático, deve-se ao facto de o batedor dinâmico necessitar de espaço/curso para o seu funcionamento e desenvolvimento e por isso estar colocado a 1.0 m da fronteira esquerda, como se vê na Figura 5.4.

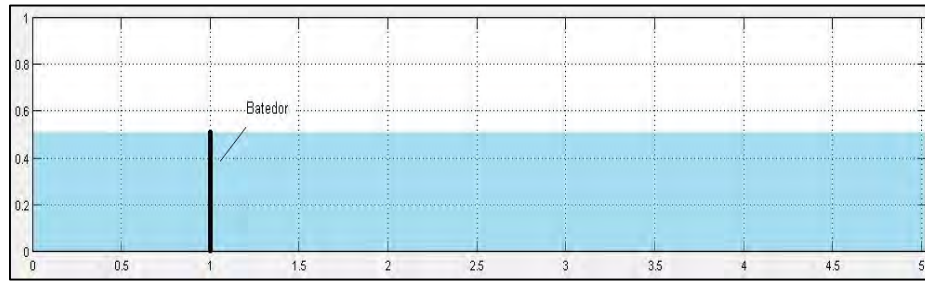


Figura 5.4: Canal parcial dinâmico (regular) de fundo plano.

A dimensão das três malhas é semelhante nas zonas homólogas.

Na secção de acoplamento é introduzida, como dado de entrada para o batedor, a reconstrução da série temporal da elevação da superfície livre obtida na simulação com o canal total na sonda G5. Essa reconstrução pode ser feita diretamente pelo programa, que transforma essa série numa soma de harmónicas para posterior utilização pelo programa, utilizando o método da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

A Transformada Rápida de Fourier (em inglês Fast Fourier Transform ou FFT) é um algoritmo eficiente para se calcular a Transformada Discreta de Fourier (DFT) e a sua inversa [17]. Um dos algoritmos mais aplicados para estimar a FFT é o de tempo em base 2, isto é, assume-se que o número de pontos do sinal é  $N=2^n$ , onde  $n$  é um número inteiro. A FFT funciona dividindo a sequência de dados num número de sequências mais pequeno. Em vez de calcular a DFT da sequência original, apenas calcula a DFT das sequências mais pequenas em que se dividiu o sinal. A FFT combina os resultados de cada parte para estimar a DFT do sinal total. No caso de sinais de pequena dimensão temporal, este método pode levar a erros que devem ser analisados.

Ambos os métodos derivam da análise de Fourier, criada por J. B. J. Fourier, uma técnica importante na área de processamento de sinais, segundo a qual qualquer sinal periódico pode ser descrito como a soma de sinais senoidais. A representação do sinal periódico como uma soma de componentes senoidais é denominada série de Fourier [17].

Embora os sinais periódicos, em geral, tenham um número infinito de harmónicas, a partir de uma certa frequência as amplitudes dessas harmónicas tornam-se muito baixas e, por isso, podem ser desprezadas.

A descrição de sinais por meio de componentes senoidais dá origem ao conceito de espectro de frequência. O espectro de amplitude do sinal representa as amplitudes dos componentes senoidais em função da frequência da componente.

Para este caso de estudo, fundo plano simples, optou-se ainda por reconstruir a série temporal utilizando também o método da Transformada Discreta de Fourier (DFT), de forma a analisar se introduzia diferenças no resultado. Para tal, apenas se utilizou a parte do registo onde a agitação está estabilizada e com um intervalo de tempo múltiplo do período de onda gerado para o canal total, que neste caso é de 2.191s.

Na Figura 5.5 pode ver-se os valores de amplitude e de fase por frequência, obtidas do sinal da série temporal, utilizando os dois métodos da transformada de Fourier para a reconstrução da onda, a ser aplicada no canal parcial com batedor estático.

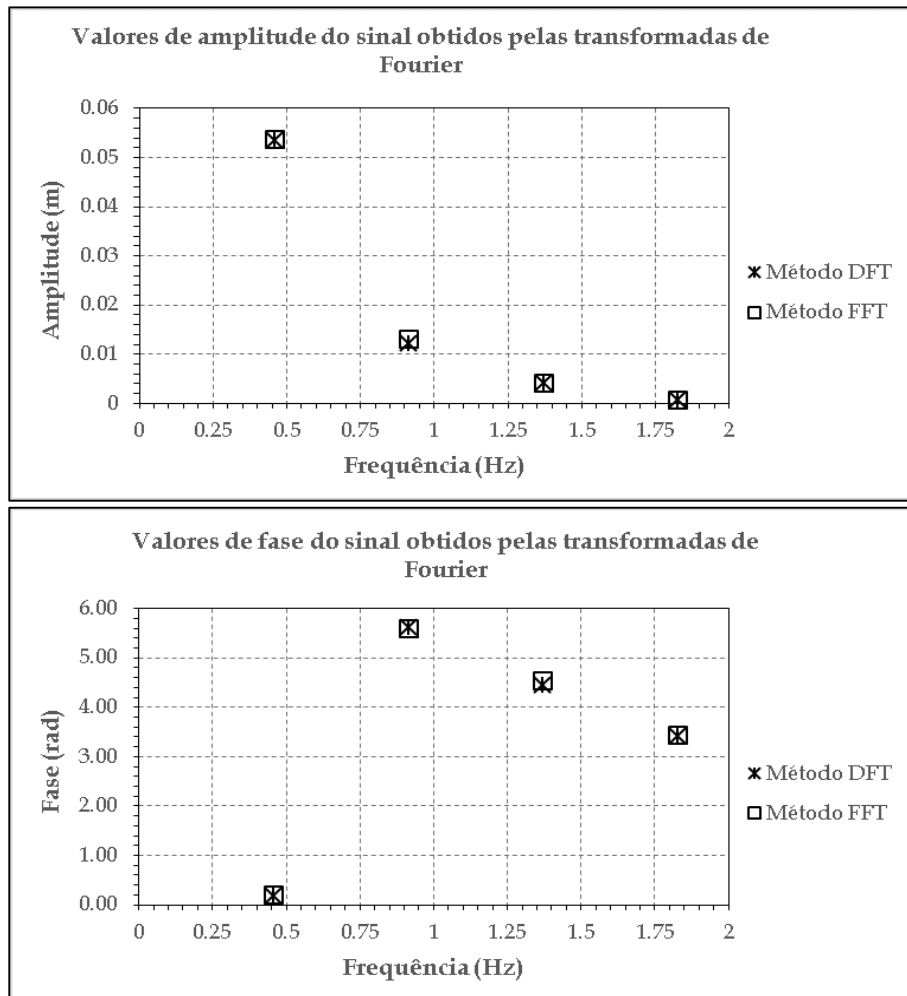


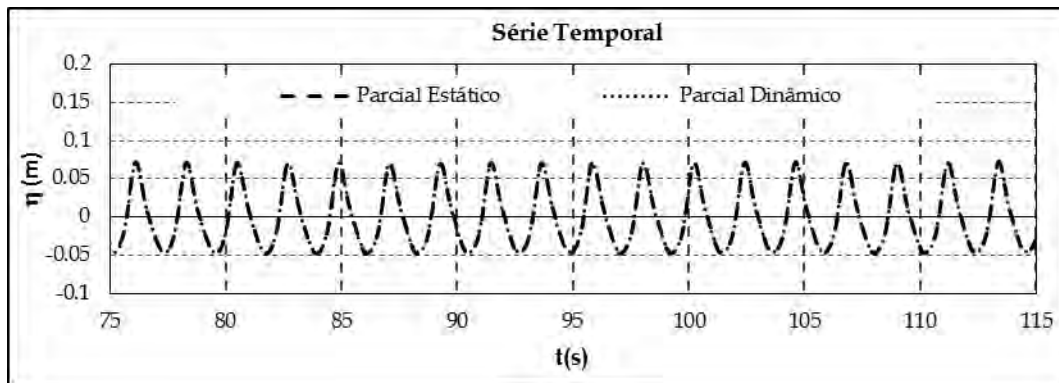
Figura 5.5: Valores de amplitude e fase obtidos pelas transformadas de Fourier.

Assim optou-se por utilizar a técnica implementada no modelo.

Conforme já foi referido, a análise centra-se na comparação de resultados obtidos em três casos: canal total, canal parcial com batedor dinâmico e canal parcial com batedor estático.

Na utilização da reconstrução da série com FFT pelo programa na situação em que a série temporal é gerada através de um batedor dinâmico, o programa deu erro (“bloqueou”) e não foi possível reconstruir a série. Este erro foi transmitido aos responsáveis do modelo, mas tornou inviável a utilização deste método para esta dissertação. Assim, optou-se por, apenas para o caso da geração com batedor dinâmico, introduzir uma onda regular com características semelhantes à da onda obtida na sonda G5, ao invés da reconstrução da onda resultante do acoplamento. O erro associado, neste caso, não é significativo, já que a onda é muito próxima de uma onda regular.

Analizando ainda a série temporal (Figura 5.6) utilizada para gerar a agitação no canal parcial dinâmico (regular) e comparando-a com a série que é inserida no canal parcial estático como resultado da reconstrução da série da sonda G5 do canal total, observa-se que ambas apresentam características muito idênticas, conforme se referiu, pelo que se considera que, neste caso, o erro cometido por se considerar agitação regular é reduzido.



*Figura 5.6: Série temporal utilizada no modelo IH-2VOF para o canal parcial dinâmico (regular) e parcial estático.*

O parâmetro utilizado na comparação dos resultados dos três casos é a elevação da superfície livre ( $\eta$ ) ao longo do tempo ( $t$ ) em vários pontos do domínio. Na Figura 5.7 pode ver-se a comparação deste parâmetro na posição das sondas G6, G7 e G8.

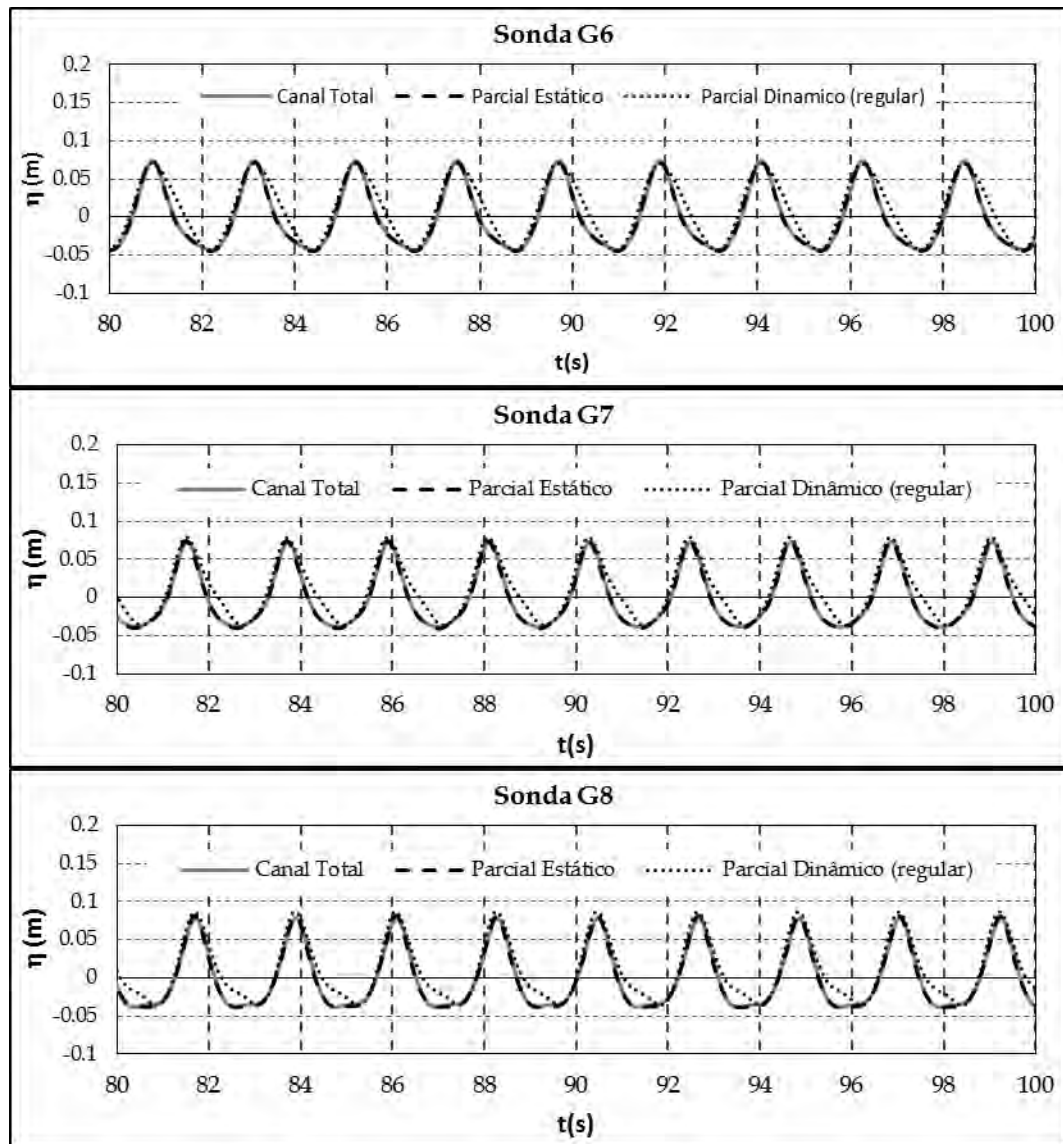


Figura 5.7: Variação Superfície Livre registada nas sondas G6, G7 e G8 – Fundo Plano.

De modo a poder comparar os resultados obtidos no canal total com os obtidos com os métodos de acoplamento nos canais parciais, efetuou-se uma análise estatística, comparando as séries temporais de elevação de superfície livre obtidas nas diversas sondas. Na Tabela 5.3 apresentam-se os valores referentes às sondas G6 a G11, assim como o erro relativo dos valores de altura de onda e período médio calculado para as ondas do canal total e dos canais parciais.

Tabela 5.3: Análise do erro entre os resultados numéricos do canal total e os canais parciais.

Análise do erro						
Análise estatística do erro					Erro relativo	
	Sonda	Bias (m)	Rmse (m)	Ic (-)	Hmedio	Tmedio
Canal Total x Parcial Estático	G6	-1.500E-04	2.198E-03	99.92%	0.5%	0.0%
	G7	-1.934E-04	3.025E-03	99.84%	3.5%	0.1%
	G8	-1.991E-04	3.044E-03	99.84%	2.7%	0.1%
	G9	-1.385E-04	2.968E-03	99.87%	2.5%	0.1%
	G10	-1.706E-04	2.794E-03	99.88%	0.2%	0.1%
	G11	-1.908E-04	2.779E-03	99.88%	0.6%	0.1%
Canal Total x Parcial Dinâmico (regular)	G6	1.083E-02	1.424E-02	96.80%	0.5%	0.1%
	G7	1.078E-02	1.368E-02	96.79%	3.7%	0.2%
	G8	1.086E-02	1.340E-02	97.29%	6.2%	0.2%
	G9	1.086E-02	1.404E-02	97.08%	5.4%	0.3%
	G10	1.068E-02	1.367E-02	97.06%	2.2%	0.2%
	G11	1.062E-02	1.342E-02	97.11%	0.5%	0.3%

Os diferentes tipos de erro apresentados na Tabela 5.3 são definidos pelas equações seguintes.

Erro médio Bias:

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y - X)}{n} \quad (5-1)$$

Erro médio quadrático:

$$\text{Rmse} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - X)^2}{n}} \quad (5-2)$$

Índice de concordância:

$$\text{Ic} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y - X|^2}{\sum_{i=1}^n (|Y - \bar{X}| + |X - \bar{X}|)^2} \quad (5-3)$$

Erro médio:

$$H_{\text{médio}} = \frac{|H_Y - H_X|}{H_X} \quad (5-4)$$

$$T_{\text{médio}} = \frac{|T_Y - T_X|}{T_X} \quad (5-5)$$

Nas equações (5.1) a (5.5),  $X$  são os valores de referência (canal total) em cada passo de tempo,  $Y$  são os valores correspondentes dos canais parciais,  $\bar{X}$  é a média do valor de referência e  $n$  é o número de pontos.

Da análise desta tabela e da Figura 5.7 pode ver-se que, para o canal parcial estático, o perfil da onda é muito próximo do canal total, com pequenas diferenças visíveis. Este resultado pode também ser verificado olhando para os valores do Bias e do Rmse, onde se mostra que os valores são ligeiramente inferiores aos resultantes do canal total. Neste caso, o índice de concordância é muito próximo de 1, o que mostra o bom funcionamento do acoplamento para o canal parcial estático.

Já no caso do batedor dinâmico, as diferenças não são tão pequenas quanto no caso do batedor estático, o que é visível nos gráficos de elevação da superfície livre (Figura 5.7). Estas podem ser verificadas pelos valores do Bias e do Rmse e, através do índice de concordância, sempre superior a 96%, que apresenta valores inferiores aos do canal parcial dinâmico (regular). Ainda assim, estes valores mostram que o funcionamento do acoplamento do canal parcial dinâmico (regular) não é, de todo, comprometido com utilização da onda regular anteriormente mencionada.

Estas diferenças devem-se não só às diferenças do modo de geração dos dois tipos de batedor como à influência da consideração das harmónicas.



Para explicar estas diferenças entre os métodos de geração, analisou-se o perfil de velocidades horizontais máximas positivas e negativas ao longo de coluna de água. No caso do canal parcial estático o perfil de velocidades horizontais é calculado utilizando a teoria linear. Já no caso do canal parcial dinâmico (regular), as velocidades são constantes em toda a coluna de água, o que é uma boa aproximação no caso de águas pouco profundas. A uma certa distância do bater, o perfil da onda já se encontra adaptado à profundidade e os perfis de velocidade também devem aproximar-se entre si. Os perfis de velocidade vertical, embora sejam diferentes nos dois casos, não foram analisados.

Na Figura 5.8 e Figura 5.9 apresentam-se os perfis de velocidades obtidos nas secções correspondentes às sondas G7, G8, G9 e G10.

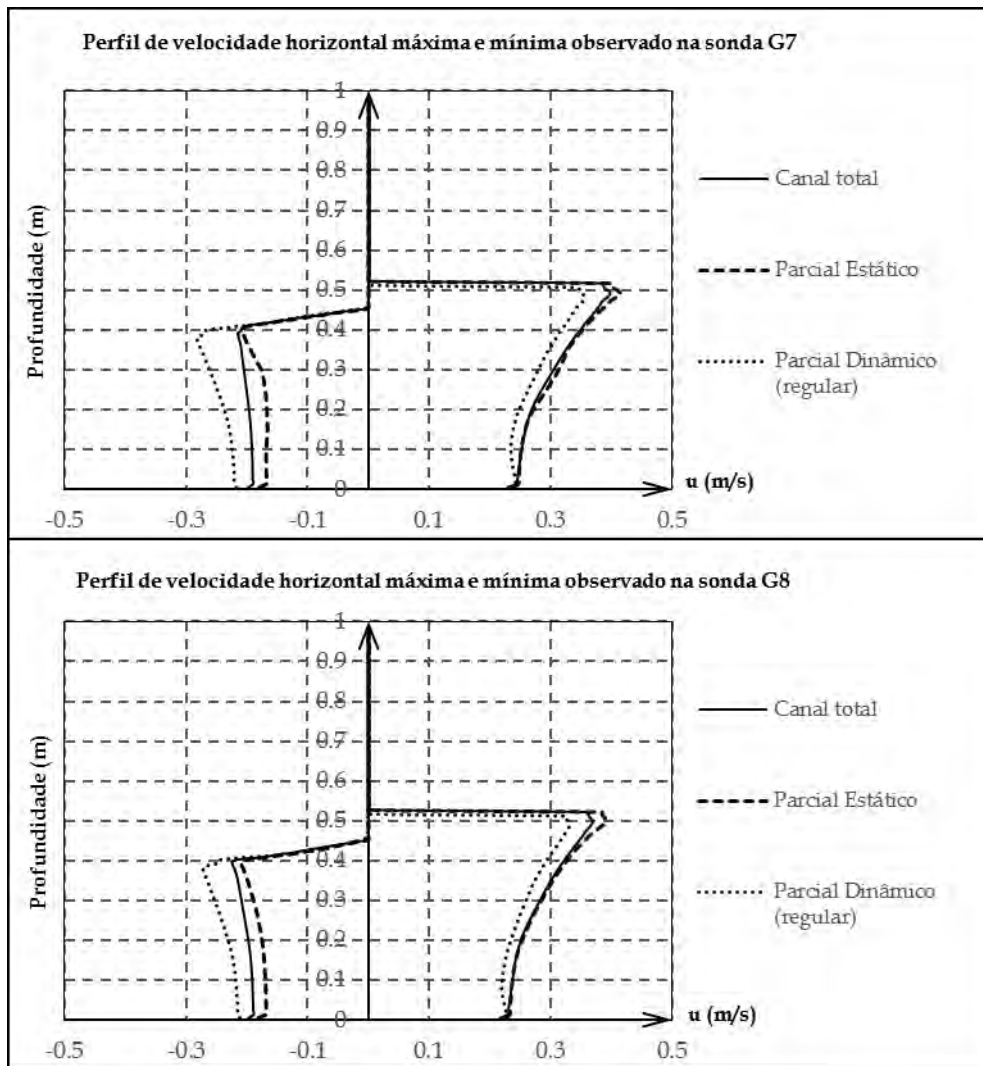


Figura 5.8: Perfil de velocidades horizontais nas sondas G7 e G8.

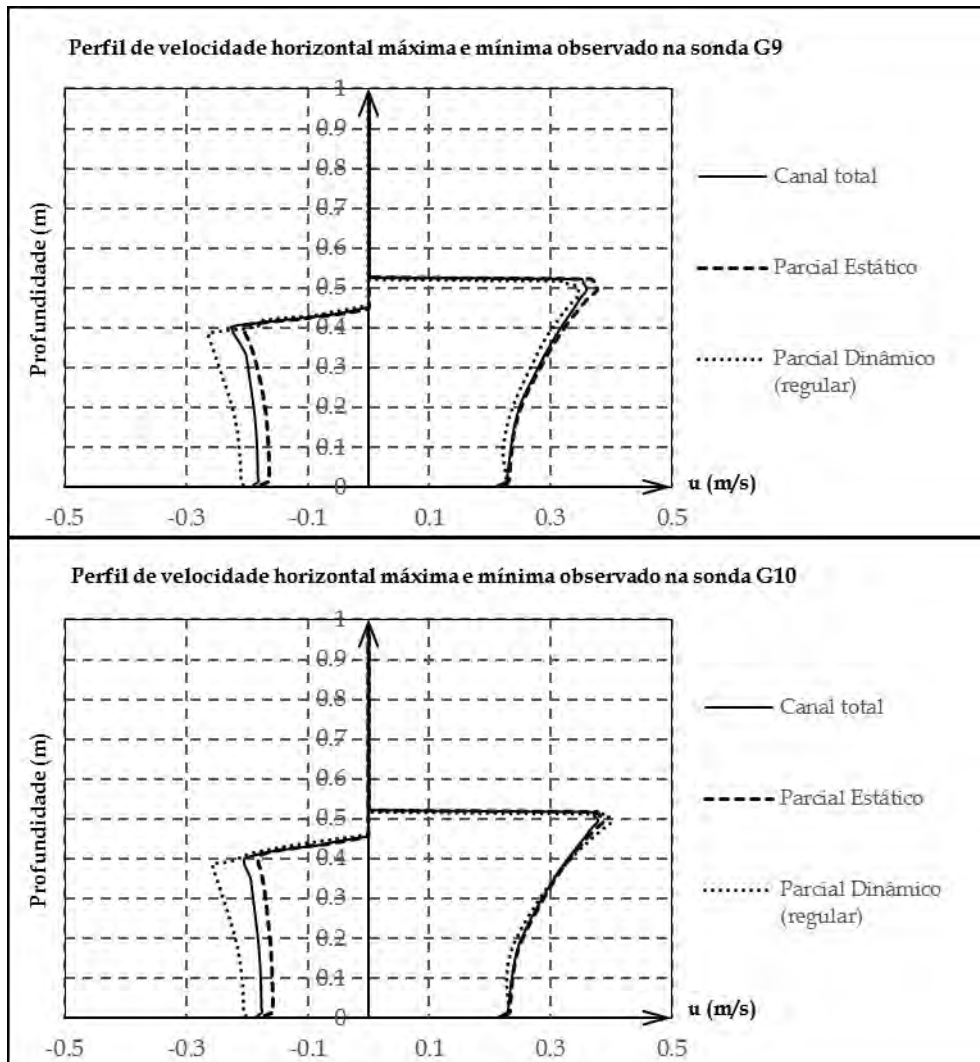


Figura 5.9: Perfis de velocidades horizontais nas sondas G9 e G10.

É possível observar que, com o aumento do afastamento da zona de geração, ou seja, da zona do batedor, os perfis de velocidade horizontal nos três diferentes casos (canal total, canal parcial estático e canal parcial dinâmico (regular)), vão-se aproximando, especialmente no que se refere às velocidades máximas positivas. No que se refere às velocidades máximas negativas, as diferenças são superiores, embora se note uma redução dessas diferenças ao longo do canal.

Isto ocorre porque, à medida que se afasta do batedor, a forma da onda vai-se modificando, adaptando-se à profundidade. Normalmente considera-se que, quando a distância à zona de geração é igual ou superior a duas vezes o comprimento da onda, a onda já se adaptou ao fundo e, por isso, a influência das características das ondas à saída do batedor devem ser mais reduzidas.

Neste caso, o comprimento de onda é de 4.547m e a distância do batedor à sonda G10 é de 2.775m, pelo que, ainda assim, a onda parece estabilizar mais cedo.

#### 5.4 Canal com fundo em rampa

Procurando progredir na análise da influência da geometria a usar do modelo até chegar ao caso de estudo alvo desta dissertação apresenta-se, neste ponto, o estudo da influência do acoplamento quando existem alterações na batimetria de fundo. Para tal foi introduzido no modelo o fundo em rampa, o mesmo considerado como batimetria no caso de estudo, cujas dimensões foram já apresentadas anteriormente na Figura 4.5.

A introdução do fundo em rampa, ainda antes de se proceder à análise do caso de estudo, passa por compreender, não só o processo de acoplamento nesta situação, mas também os efeitos que o fundo inclinado provoca na propagação da onda ao longo do canal.

Na Figura 5.10 apresenta-se, de forma esquemática, o perfil longitudinal do modelo numérico com o fundo inclinado, cujo comprimento do canal, assim como o nível de água em repouso junto da zona de geração, é igual ao da situação anteriormente apresentada, com fundo plano.

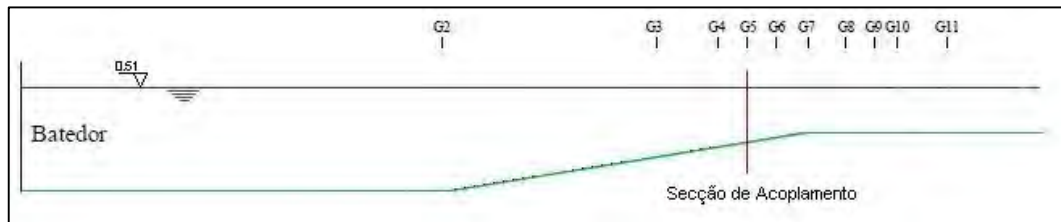


Figura 5.10: Representação esquemática do perfil do canal total com fundo inclinado.

A condição de agitação ensaiada é a mesma que foi considerada no exemplo anterior (ver Tabela 5.2), isto é,  $H=0.1167\text{m}$  e  $T=2.191\text{s}$  (valores à escala 1:30), assim como as dimensões e discretização da malha.

A alteração do fundo plano para um fundo em rampa causa, logo à partida, uma alteração ao modelo do canal parcial, isto é, a partir da seção de acoplamento. Nesta zona, a presença da rampa faz com que a profundidade de água, em repouso, nos canais parciais seja diferente do caso com o fundo plano, havendo uma diminuição do seu valor (Figura 5.11 e Figura 5.12), já que a seção de acoplamento está localizada na zona em rampa.

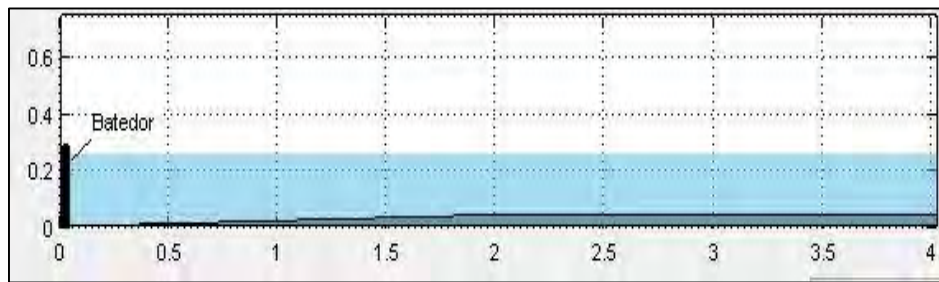


Figura 5.11: Canal Parcial Estático com fundo inclinado.

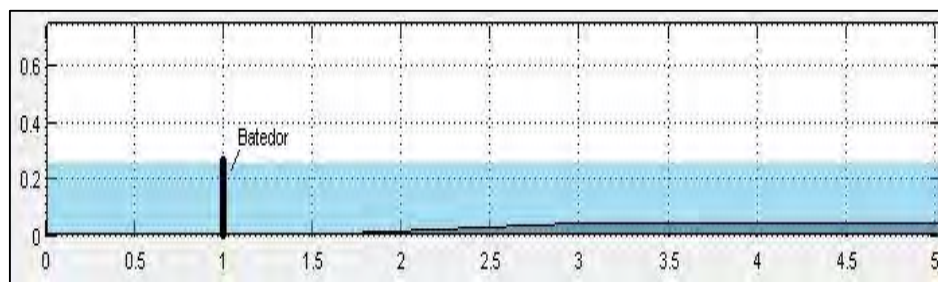


Figura 5.12: Canal Parcial Dinâmico (regular) com fundo inclinado.

Tal como no caso anterior, na secção de acoplamento é introduzida, como dado de entrada para o batedor, a reconstrução da série temporal da elevação da superfície livre obtida na simulação com o canal total na sonda G5, feita diretamente pelo programa para o caso do canal parcial estático. Para tal, apenas se utilizou a parte do registo onde a agitação está estabilizada e com um intervalo de tempo múltiplo do período de onda gerado para o canal total, que neste caso é de 2.191s. Para o canal parcial dinâmico utilizou-se a correspondente onda regular, isto é, apenas as características,  $H$  e  $T$ , da harmónica principal.

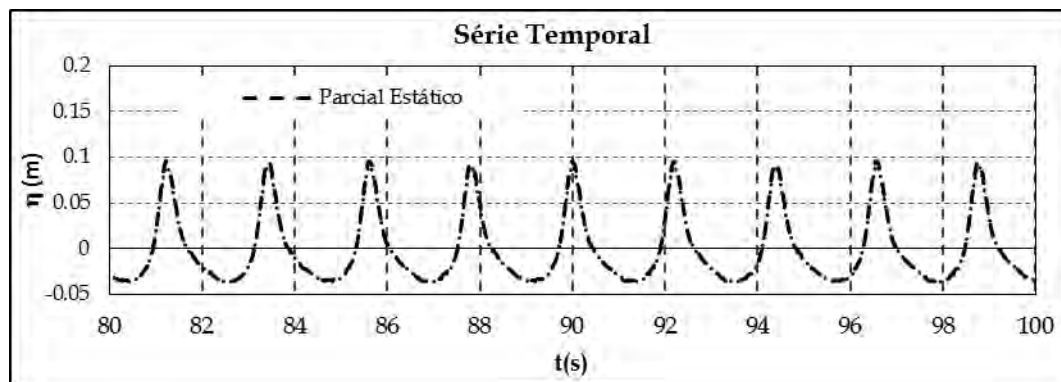


Figura 5.13: Série temporal utilizada no modelo IH-2VOF para o Canal Parcial Dinâmico (regular) e Parcial Estático.

Para o estudo desse caso foi também analisada a variação da superfície livre ao longo do tempo nas várias sondas dispostas ao longo do canal (já apresentadas anteriormente).

Na Figura 5.14 e Figura 5.15 apresentam-se as comparações feitas entre os três canais (Canal Total, Canal Parcial Estático e Canal Parcial Dinâmico (regular)), para as sondas G7, G8 e G9.

Analisando os resultados, observa-se que a série temporal é diferente do caso anterior, com fundo plano, afastando-se mais de um perfil de onda regular, aparecendo a forma resultante da presença de harmônicas, visível na forma da cava, como consequência da propagação numa zona onde a profundidade se vai reduzindo progressivamente.

Em relação à variação de superfície livre obtida nos três casos, verifica-se que o Canal Total e Parcial Estático apresentam um perfil de variação muito semelhante, enquanto o referente ao Canal Parcial Dinâmico (regular) difere dos outros dois canais, especialmente na cava da onda.

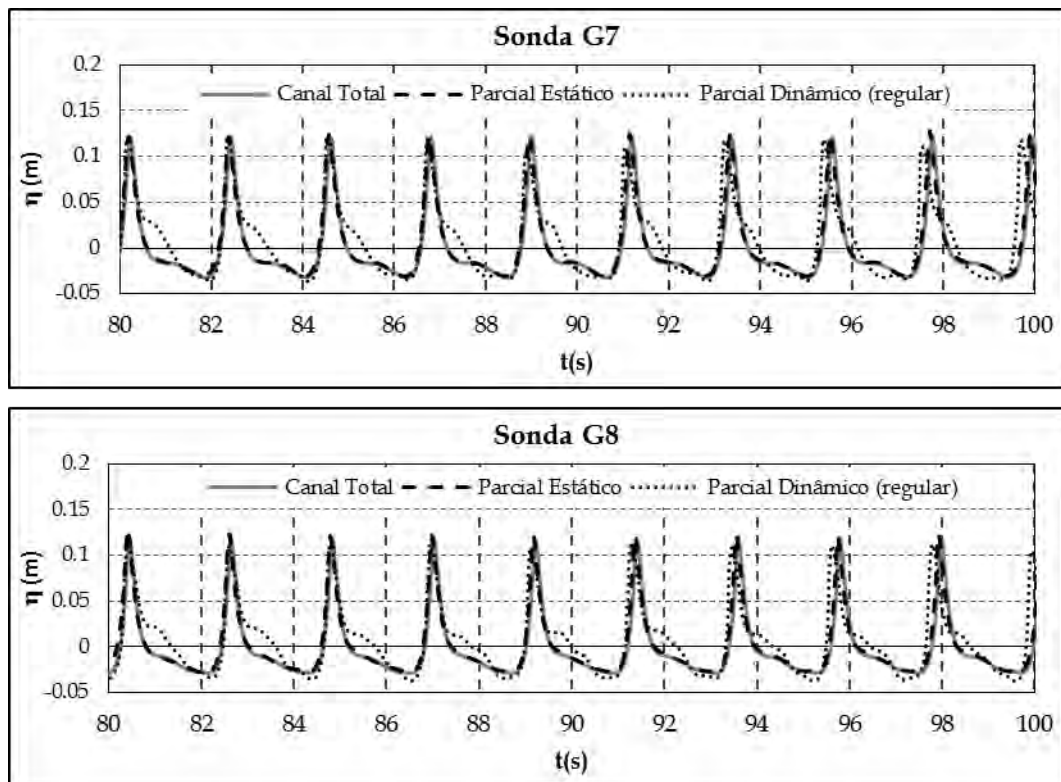


Figura 5.14: Variação superfície livre registrada nas sondas G7 e G8 – fundo inclinado.

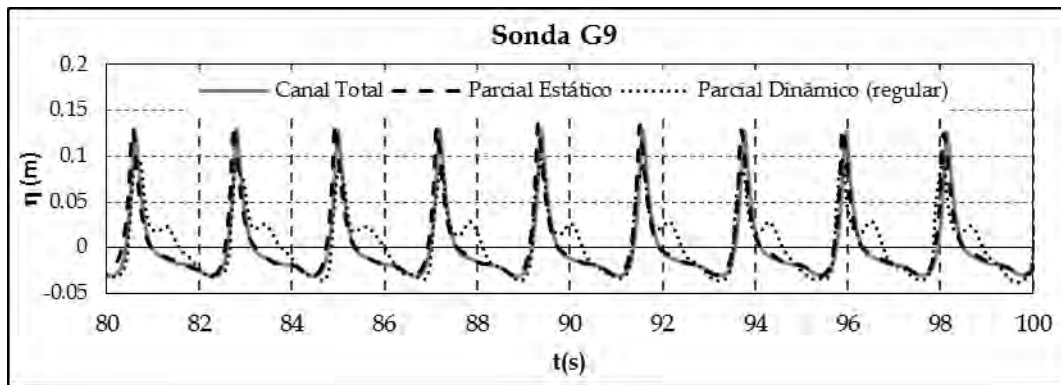


Figura 5.15: Variação superfície livre registada nas sondas G9 – fundo inclinado.

Esta diferença pode, de certa forma, explicar-se através das diferenças do sinal da onda incidente no domínio de cálculo. Como se pode observar na Figura 5.16, neste caso, a amplitude do sinal

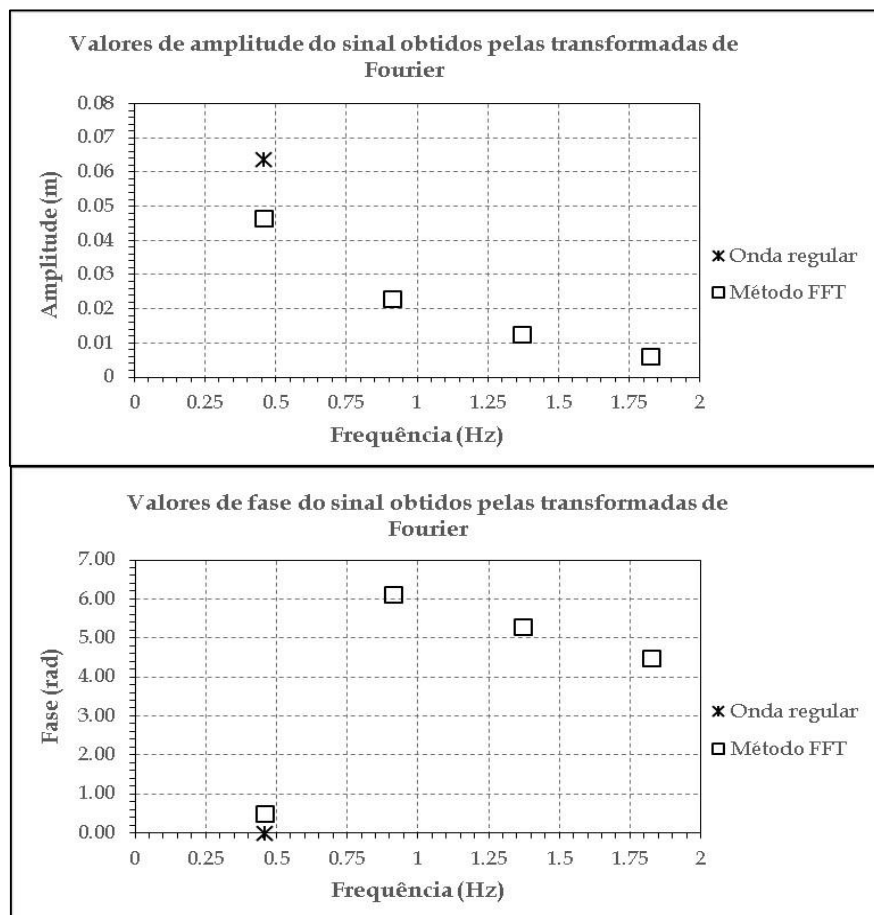


Figura 5.16: Valores de amplitude e de fase – comparação entre o sinal da onda regular e do sinal obtido para a onda reconstruída através do método FFT.

no caso da onda regular apenas com a primeira harmónica é maior, o que justifica as diferenças obtidas na superfície livre ao longo do canal.

Na Figura 5.17, mostra-se o espectro de amplitudes do sinal de onda registados na sonda G7, para o Canal Total, o Canal Parcial Estático e o Canal Parcial Dinâmico (regular). Da análise desta figura, pode-se observar que no Canal Parcial Dinâmico (regular) a amplitude nas várias componentes difere das restantes, que se assemelham entre si. De facto, para a primeira componente harmónica,  $1/T=0.456$  Hz, o valor do canal Parcial Dinâmico (regular) é superior ao dos outros canais, o que pode ser explicado pelo facto de ser essa a única componente introduzida no batedor, mas nas restantes harmónicas o valor é inferior.

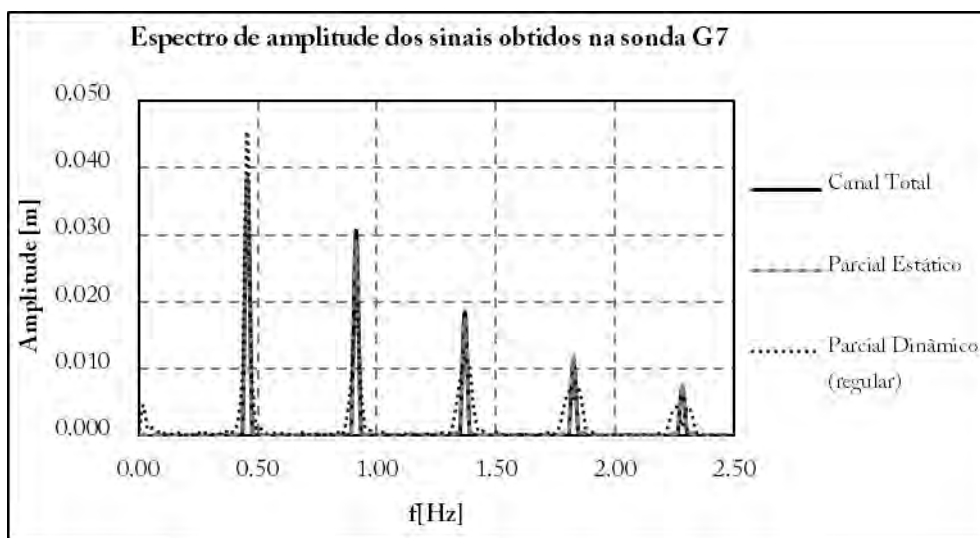


Figura 5.17: Espectro de amplitudes do sinal registado na sonda G7 nos diferentes canais.

Efetuiu-se também, para este caso, uma análise estatística semelhante à apresentada anteriormente, comparando as séries temporais de elevação de superfície livre obtidas nas diversas sondas. Na Tabela 5.4 apresentam-se os valores do Bias, Rmse e Ic referentes às sondas G6 a G11, assim como o erro relativo dos valores de altura de onda e período médio entre o Canal Total e os Canais Parciais.

Analisando os resultados da análise estatística, constatamos que existe, face ao caso anterior, um aumento do erro, sobretudo para o Canal Parcial Dinâmico (regular), o que confirma os resultados da variação de superfície livre apresentados. O acoplamento com o Canal Parcial Estático apresenta erros bastante reduzidos, com um Ic superior a 96%, o que permite utilizar este tipo de acoplamento de forma fiável para casos de propagação sobre fundo em rampa. Já a utilização de batedor dinâmico utilizando como dado de entrada apenas a primeira harmónica da série temporal

na zona de acoplamento faz aumentar o erro do acoplamento, embora neste caso esse erro não seja muito elevado, já que os valores de  $I_c$  são superiores a 89%.

Tabela 5.4: Análise do erro entre os resultados numéricos do Canal Total e os Canais Parciais.

Análise do erro						
Análise estatística do erro				Erro relativo		
	Sonda	Bias (m)	Rmse (m)	$I_c$ (-)	Hmedio	Tmedio
Canal Total x Parcial Estático	G6	1.554E-03	4.361E-03	99.68%	0.5%	0.0%
	G7	1.477E-03	1.180E-02	97.61%	0.5%	0.0%
	G8	1.463E-03	1.322E-02	97.61%	1.0%	0.1%
	G9	1.723E-03	1.462E-02	96.03%	5.3%	0.0%
	G10	1.696E-03	1.557E-02	95.86%	6.8%	0.0%
	G11	2.094E-03	1.561E-02	95.70%	4.7%	0.0%
Canal Total x Parcial Dinâmico (regular)	G6	9.165E-03	2.594E-02	88.69%	5.4%	0.2%
	G7	9.257E-03	3.042E-02	84.66%	1.8%	0.1%
	G8	1.014E-02	3.003E-02	82.19%	1.2%	0.2%
	G9	9.988E-03	2.974E-02	82.89%	13.6%	2.2%
	G10	1.047E-02	3.093E-02	83.22%	13.6%	2.2%
	G11	1.157E-02	3.055E-02	83.72%	13.0%	6.3%

Da mesma forma que foi feito anteriormente, analisou-se também o perfil de velocidades horizontais máximas e mínimas. A Figura 5.18 mostra o perfil de velocidades registadas na sonda G7 em cada um dos três canais que, no caso de estudo, fica posicionada junto ao pé da estrutura.



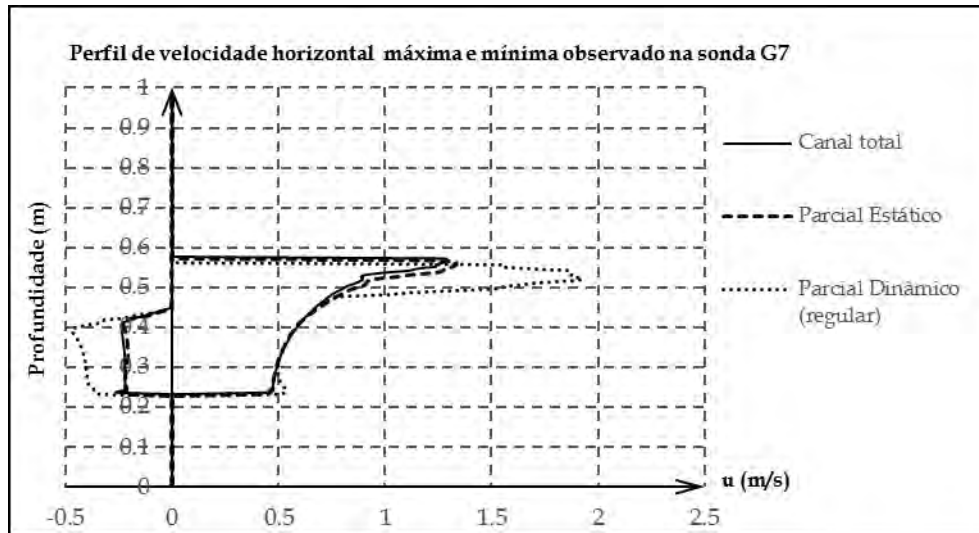


Figura 5.18: Perfil de velocidade máxima e mínima – Sonda G7.

Da análise da figura pode verificar-se que os perfis referentes ao Canal total e ao Canal Parcial Estático são muito próximos, quer para os valores máximos quer para os valores mínimos. Quanto ao perfil de velocidades do Canal Parcial Dinâmico (regular), a sua configuração difere dos outros dois canais, apresentando um valor máximo de velocidades bastante mais elevado, o que pode ser devido à ocorrência de rebentação. De facto, na Figura 5.19, onde se ilustra uma sequência de vários instantes na passagem da onda na proximidade da sonda G7 (cuja distância à zona de geração é de 0.055 m), consegue-se observar a rebentação da onda nesta zona.

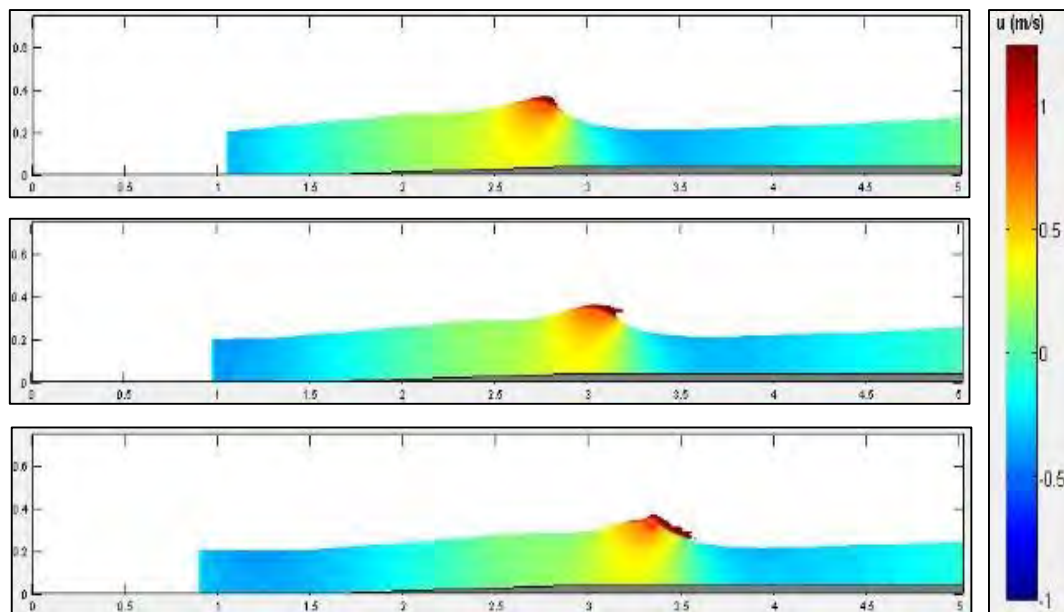


Figura 5.19: Velocidade horizontal – Sequência da passagem de onda junto à sonda G7

Para verificar a influência, nos resultados da superfície livre, da geração da agitação com batedor estático ou dinâmico, compararam-se ainda os resultados dos canais parciais estático e dinâmico, utilizando a mesma condição de agitação, a condição utilizada anteriormente para o Canal Parcial Dinâmico (regular).

Na Figura 5.20 apresentam-se as comparações feitas entre os canais Parcial Estático (regular) e Canal Parcial Dinâmico (regular), para a sonda G7. Na Tabela 5.5 apresentam-se os valores do Bias, Rmse e Ic referentes às sondas G6 a G11, assim como o erro relativo dos valores de altura de onda e período médio entre o canal total e os canais parciais.

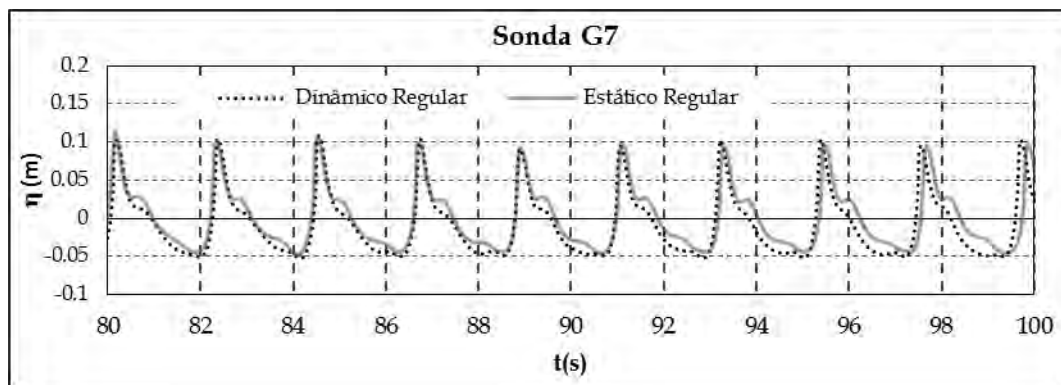


Figura 5.20: Variação da superfície livre obtida na sonda G7 para o Canal Parcial Dinâmico (regular) e o Canal Parcial Estático (regular).

Tabela 5.5: Análise do erro entre os resultados numéricos do Canal Parcial Dinâmico (regular) e do Canal Estático (regular).

Análise do erro						
Análise estatística do erro				Erro relativo		
	Sonda	Bias (m)	Rmse (m)	Ic (-)	Hmedio	Tmedio
Dinâmico regular x Estático regular	G6	-8.096E-03	1.839E-02	95.03%	1.3%	0.2%
	G7	-6.457E-03	1.785E-02	95.02%	10.0%	0.2%
	G8	-7.308E-03	1.779E-02	95.02%	11.5%	0.2%
	G9	-6.189E-03	1.354E-02	96.00%	5.8%	2.0%
	G10	-7.490E-03	1.498E-02	95.54%	10.0%	2.1%
	G11	-7.712E-03	1.613E-02	95.37%	9.5%	6.4%

Observando a Tabela 5.5, conclui-se que, o erro relativo de  $H_{\text{médio}}$ , para algumas sondas, é considerável, da ordem dos 10%. No caso da sonda G7, cuja variação da superfície livre no tempo se apresentou na Figura 5.20, o erro relativo é de 10%. No entanto, em termos estatísticos, o índice de concordância, que tem em conta toda a série temporal, apresenta um erro relativamente pequeno, com valores da ordem dos 95%. Esta diferença deve-se à diferença do modo de geração, referido anteriormente.

### 5.5 Canal com a secção transversal do quebra-mar poente do Porto de Albufeira

Dando continuação à análise da influência das várias componentes do modelo, neste ponto efetuou-se o estudo da secção da estrutura que diz respeito ao caso de estudo.

Na Figura 5.21 apresenta-se, de forma esquemática, o perfil longitudinal do modelo numérico ensaiado.

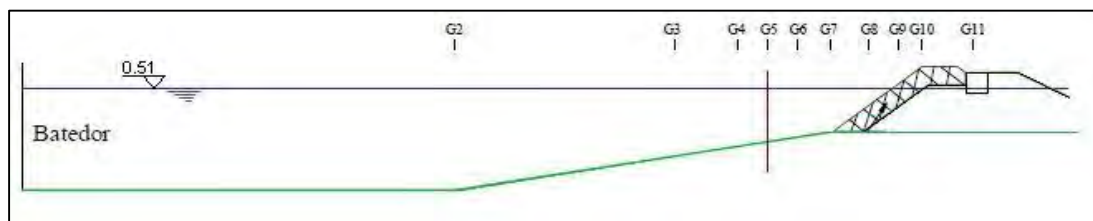


Figura 5.21: Representação esquemática do perfil do Canal Total do caso de estudo.

A condição de agitação ensaiada é a mesma que foi considerada para os dois casos anteriores (ver Tabela 5.2), isto é,  $H=0.1167\text{m}$  e  $T=2.191\text{s}$  (valores à escala 1:30), bem como as dimensões e discretização da malha de elementos finitos.

As condições do acoplamento para este caso, serão muito semelhantes às do caso anterior, apenas com a rampa de fundo, uma vez que até à secção de acoplamento assinalada na Figura 5.21, as condições são as mesmas. Assim, a série temporal introduzida nos canais parciais é a mesma que foi reconstruída e aplicada nos canais parciais da análise anterior, do fundo em rampa.

Em relação às características dos mantos que compõem a estrutura (porosidade e coeficientes de fricção linear e não-linear), para este caso foram considerados os seguintes valores, apresentados na Tabela 5.6:

Tabela 5.6: Características dos mantos constituintes da estrutura.

	$n$	$\alpha$	$\beta$	Added Mass	$D_{50}$
<b>Manto Principal</b>	0.35	200	0.7	0.34	0.053
<b>Manto Secundário</b>	0.35	200	1.1	0.34	0.030
<b>Manto Secundário int.</b>	0.35	200	1.1	0.34	0.022
<b>TOT</b>	0.3	200	0.8	0.34	0.013

As figuras 5.22 e 5.23 mostram a estrutura dos canais parciais aplicadas nesta análise, com posição do batedor.

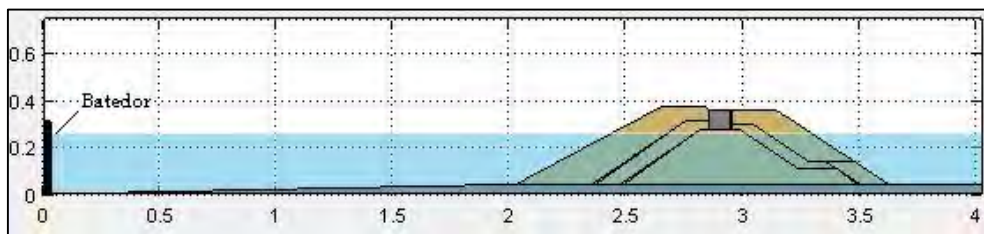


Figura 5.22: Canal Parcial Estático - análise com estrutura.

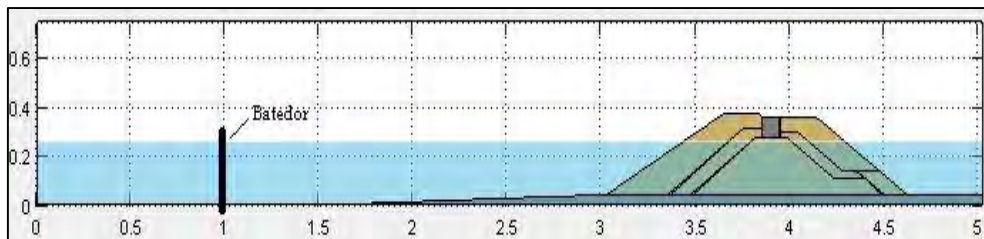


Figura 5.23: Canal Parcial Dinâmico (regular) - análise com estrutura.

Tal como nas análises precedentes, foi considerada a variação da superfície livre registada nas várias sondas existentes.

Deste modo, na Figura 5.24 apresentam-se as comparações das séries temporais da superfície livre obtidas nos três canais (Canal Total, Canal Parcial Estático e Canal Parcial Dinâmico (regular)), nas sondas G7, G8, G9 e G10.

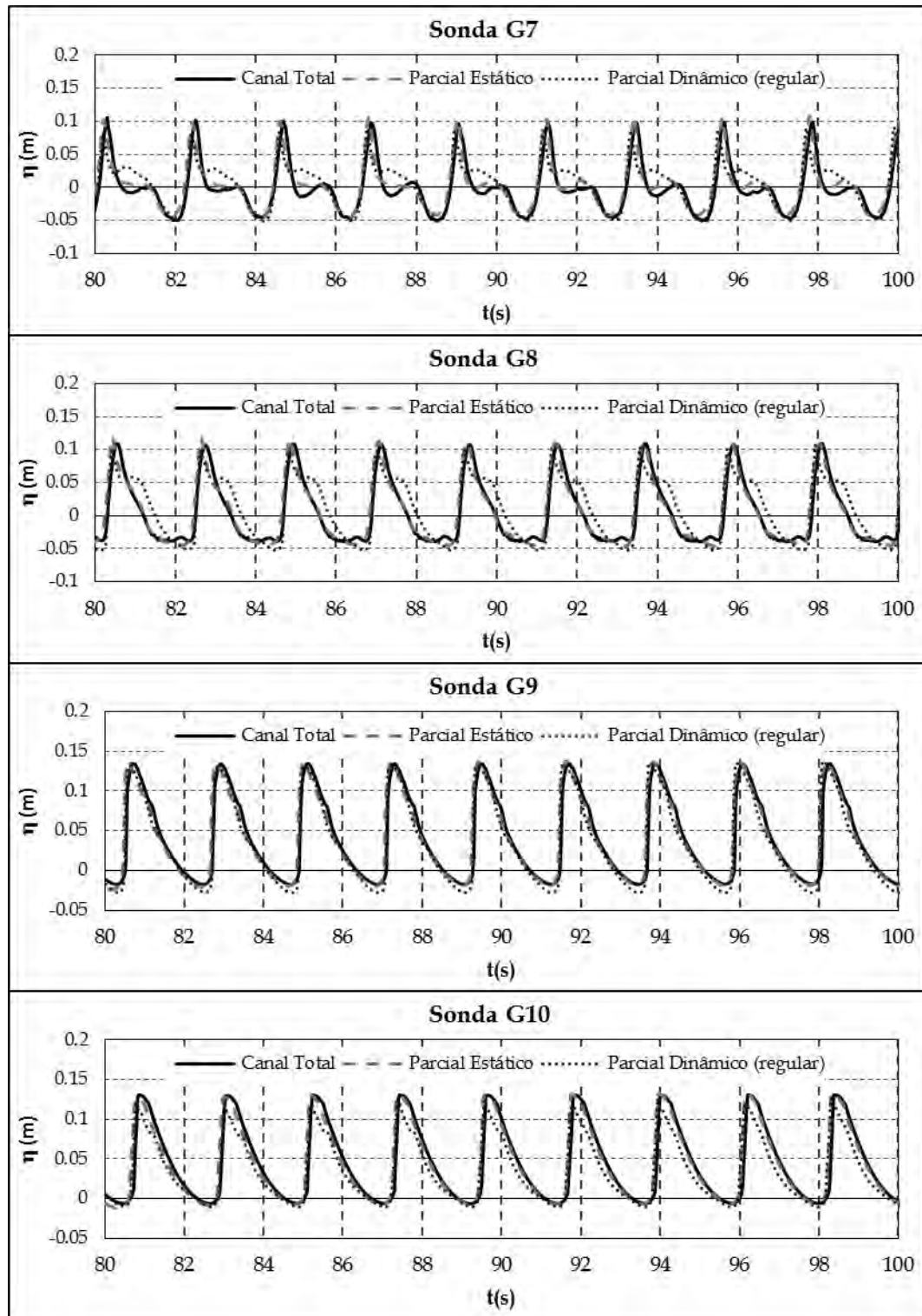


Figura 5.24: Variação da superfície livre registada nas sondas G7, G8, G9 e G10 – Canal com estrutura.

Analisando os resultados, observa-se que os registos das séries temporais diferem do caso anterior, com fundo inclinado. À passagem pela sonda G7 é visível a presença de harmónicas que alteram a forma da onda entre os três casos que, tal como no caso anterior, são consequência da presença

do fundo. No entanto, aqui a forma da onda está também influenciada pela presença da estrutura que, pelas suas características porosas, causa não só reflexão mas também dissipação da onda e, embora em menor grau, transmissão da onda.

Em relação à variação de superfície livre obtida nos três casos, verifica-se que o Canal Total e o Canal Parcial Estático apresentam um perfil sem grandes diferenças entre si, enquanto o Canal Parcial Dinâmico (regular) difere dos anteriores, especialmente nas sondas mais próximas da zona de geração.

A forma da onda registada nas sondas G9 e G10 tem uma configuração bastante mais uniforme e regular e os valores dos três canais são semelhantes. Esta forma é devida a que, como estas sondas estão no interior da estrutura, os meios porosos servem de filtro às harmónicas, sendo responsáveis por esta linearização das ondas.

Na Figura 5.25 apresenta-se o espectro de amplitudes do sinal de onda registados na sonda G7, para o Canal Total, para o Canal Parcial Estático e para o Canal Parcial Dinâmico (regular). Da análise desta figura, pode-se observar que no Canal Parcial Dinâmico (regular) a amplitude nas várias componentes difere ligeiramente das restantes, que apresentam valores mais próximos entre si. A primeira componente harmónica do canal Parcial dinâmico (regular) é relativamente superior à dos outros canais, o que explica, da mesma forma que no caso anterior, apenas com o fundo inclinado, as diferenças ao nível da variação de superfície livre.

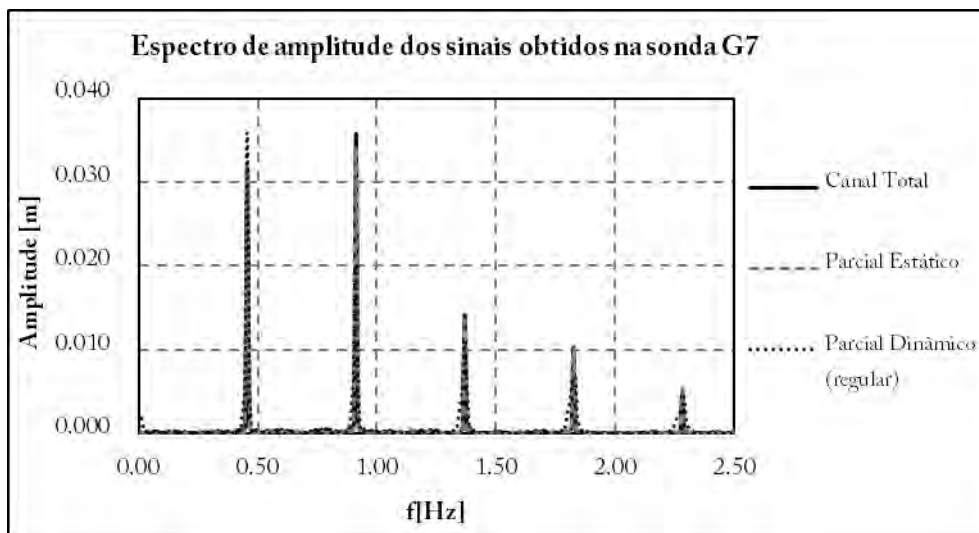


Figura 5.25: Espectro de amplitude dos sinais registados na sonda G7 nos vários canais.

Com os resultados da variação de superfície livre obtidos, efetuou-se a análise estatística apresentada na Tabela 5.7 relativa à série temporal da superfície livre e ao erro relativo dos parâmetros da onda ( $H_{medio}$  e  $T_{medio}$ ).

Tabela 5.7: Análise do erro entre os resultados numéricos do Canal Total e os Canais Parciais.

Análise do erro						
Análise estatística do erro				Erro relativo		
	Sonda	Bias (m)	Rmse (m)	Ic (-)	$H_{medio}$	$T_{medio}$
Canal Total x Parcial Estático	G6	2.119E-03	1.052E-02	98.93%	5.4%	0.0%
	G7	3.567E-03	6.985E-03	99.01%	3.4%	2.1%
	G8	6.378E-04	5.053E-03	99.01%	1.7%	0.1%
	G9	6.162E-04	2.406E-03	99.95%	1.4%	0.0%
	G10	3.134E-04	5.099E-03	99.70%	0.4%	0.0%
	G11	-2.705E-04	3.650E-03	95.81%	5.5%	0.0%
Canal Total x Parcial Dinâmico (regular)	G6	5.251E-03	2.676E-02	93.47%	14.1%	0.2%
	G7	4.691E-03	3.131E-02	75.97%	65.9%	101%
	G8	6.774E-03	2.751E-02	75.97%	2.3%	0.1%
	G9	-4.362E-03	2.891E-02	92.45%	11.2%	0.2%
	G10	-6.335E-03	3.024E-02	88.41%	5.8%	0.2%
	G11	8.409E-03	1.247E-02	73.83%	21.4%	0.2%

Da observação dos valores da tabela, constata-se que o erro entre o Canal Total e o Canal Parcial Estático é muito pequeno, com um índice de concordância naturalmente alto em todas as sondas, da ordem dos 99%, exceto na sonda G11, na zona impermeável, onde se reduz para aproximadamente 96%.

Já para o caso do Canal Parcial Dinâmico (regular), os erros relativos ao Canal Total apresentam valores mais baixos do índice de concordância, variando entre 88% e 93%, o que significa que os



valores não são tão próximos uns dos outros, ou seja, que o acoplamento com um batedor dinâmico (regular) introduz erros apreciáveis na elevação da superfície livre.

O perfil de velocidades horizontais máximas e mínimas foi também determinado. A Figura 5.26 mostra o perfil de velocidades registadas na sonda G7 em cada um dos três canais que, neste caso de estudo, fica posicionada junto ao pé da estrutura.

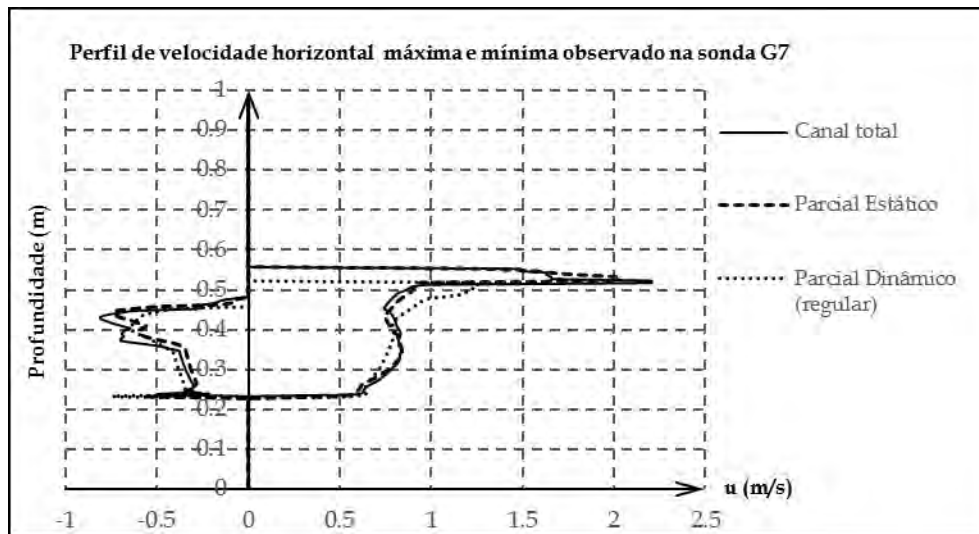


Figura 5.26: Perfil de velocidade máxima e mínima – Sonda G7, canal com estrutura.

Neste caso, tal como no caso de fundo em rampa e fundo horizontal, os perfis de velocidades do Canal total e parcial estático são bastante próximos. Já relativamente ao perfil do Canal Parcial Dinâmico (regular), embora mais próximo dos outros que no caso do fundo em rampa, difere essencialmente no valor máximo positivo, sendo inferior aos outros dois.

Visto só considerar, para este caso, a presença da estrutura, são também comparados os valores do galgamento para os três canais e analisadas as diferenças entre ambos, uma vez que este é um dos principais objetivos desta dissertação.

Para este caso, analisou-se o caudal médio galgado ao longo do tempo. Os valores foram os registados pela sonda G11, que se encontra no coroamento da estrutura, a uma altura de 0.61m (Figura 5.27).



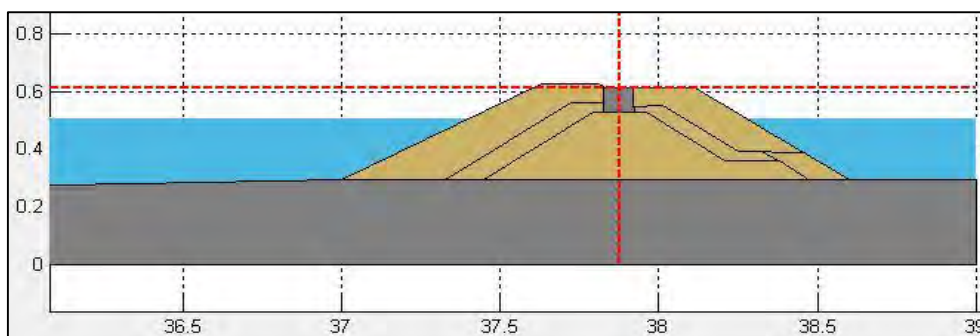


Figura 5.27: Seção e altura a que se pretende analisar o caudal de galgamento.

Os valores dos caudais médios galgados,  $Q$ , para os três canais são os que se apresentam na Figura 5.28.

Os valores de caudal médio galgado obtidos para o Canal Total e o Canal Parcial Estático são muito parecidos, diferindo apenas 4% entre si. No entanto, o Canal Parcial Dinâmico (regular) apresenta resultados bastante diferentes, com um valor muito abaixo, diferindo em cerca de 86% dos resultados dos outros dois canais.

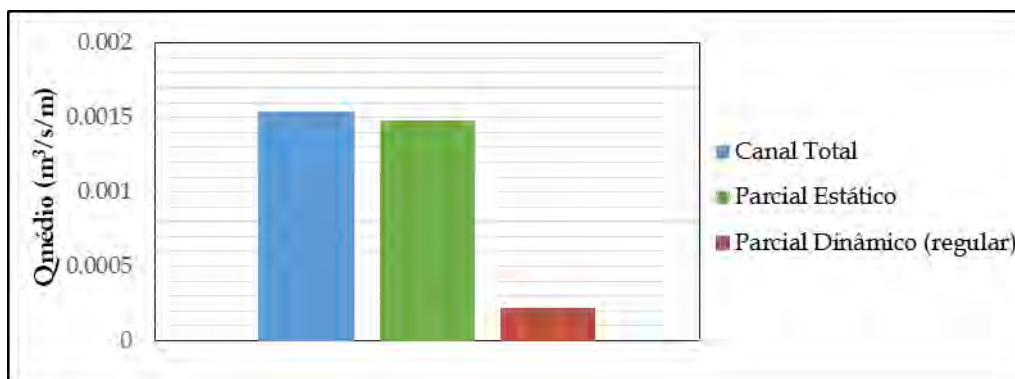


Figura 5.28: Valores de caudal galgado médio.



## CAPÍTULO VI

# Análise da influência das características do núcleo e dos mantos constituintes

### 6.1 Casos estudados

Neste capítulo apresenta-se a análise efetuada sobre a influência das características dos mantos que compõem a estrutura nos resultados do modelo.

Esta análise irá permitir analisar a influência, no galgamento, das simplificações consideradas na aplicação do modelo SPHyCE, desenvolvido no âmbito do projeto SPACE e referido anteriormente.

O modelo SPHyCE, em termos de geometria, inicialmente permitia apenas “modelar os blocos das camadas do manto exterior. Esta abordagem exige considerar as camadas subjacentes impermeáveis e implica que os blocos do manto exterior estejam assentes sobre uma fronteira impermeável” [16]. Posteriormente foi possível modelar também os blocos do manto secundário, mantendo o núcleo impermeável. A Figura 6.1 mostra a geometria do quebra-mar do porto de pesca de Albufeira, utilizada no SPHyCe, com a simulação dos blocos dos dois mantos (exterior e secundário), cada um constituído por duas camadas de blocos de diferentes tamanhos, e o núcleo impermeável.

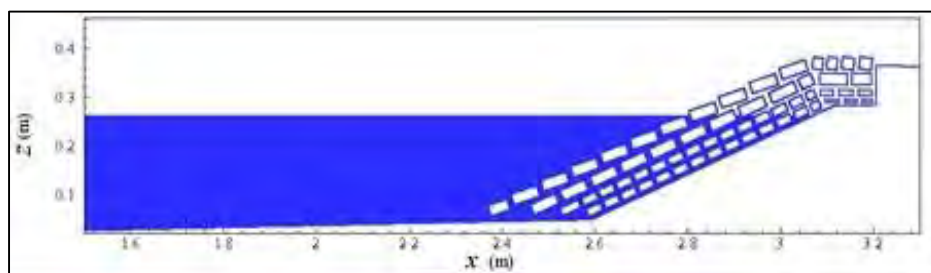


Figura 6.1: Exemplo do modelo do quebra-mar aplicado no modelo numérico SPH [18].

Assim, analisaram-se, com o modelo IH-2VOF, configurações da estrutura ligeiramente diferentes no que diz respeito à permeabilidade dos mantos. Na primeira situação considerou-se o núcleo impermeável (Figura 6.2) e na segunda situação, além do núcleo, impermeabilizou-se o manto secundário (Figura 6.3) mantendo as características do manto principal.

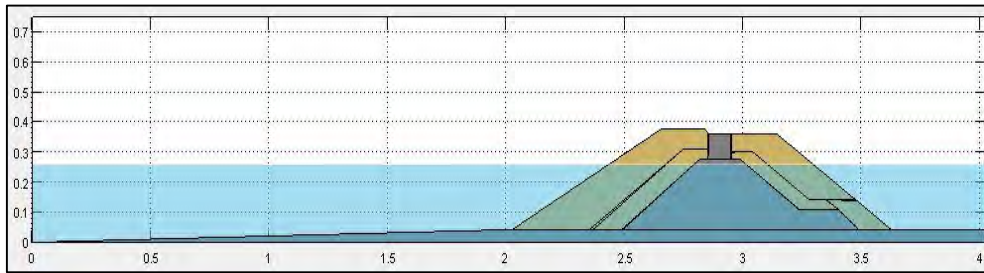


Figura 6.2: Modelo da secção do quebra-mar, ensaio com núcleo impermeável.

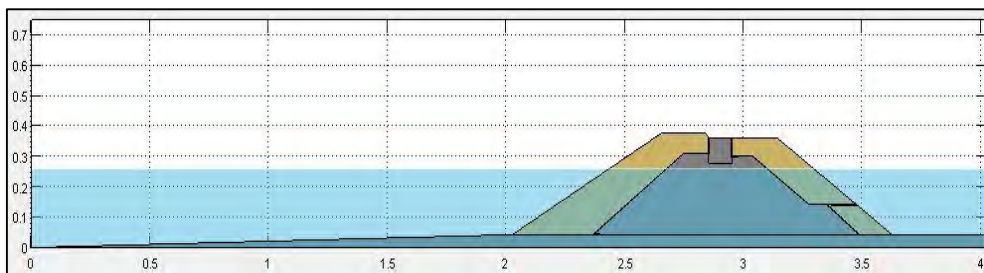


Figura 6.3: Modelo da secção do quebra-mar, ensaio com núcleo e manto secundário impermeáveis.

A simulação foi feita para o canal parcial, isto é, a profundidade da água junto ao baterdor é de 0.2595m, e considerou-se o baterdor estático. A série temporal introduzida nos canais parciais é a mesma que foi reconstruída e aplicada nos canais parciais da análise anterior, do fundo em rampa e que resultou da propagação, no canal inicial (ver ponto 5.5), da agitação com:  $H=0.1167\text{m}$  e  $T=2.191\text{s}$ . A discretização da malha é a mesma utilizada nos casos anteriores (ver ponto 5.5).

Finalmente, alteraram-se as características do manto principal, alterando o valor do coeficiente de atrito não linear,  $\beta$ . Nesta análise, as características da agitação são diferentes,  $H=0.118\text{m}$  e  $T=2.191\text{s}$ , a fim de se compararem os resultados com os obtidos em modelo físico.

## 6.2 Núcleo e manto secundário impermeáveis

Para analisar a influência de se considerar algum dos mantos ou núcleo como impermeáveis, fizeram-se simulações considerando:

- Núcleo impermeável (Figura 6.2);
- Núcleo e manto secundário impermeáveis (Figura 6.3).

Para as características dos outros mantos que compõem a estrutura (porosidade, coeficientes de fricção linear e não-linear), foram considerados os valores apresentados na Tabela 5.6.

Na Figura 6.4 apresentam-se os resultados destes três casos no que se refere ao caudal médio galgado. O resultado é, à partida, espetável: uma vez introduzida uma zona impermeável na secção da estrutura, essa característica terá como consequência um aumento da capacidade refletora e, por sua vez, minoração das capacidades de dissipação, face à ação da agitação marítima sobre si, fazendo com que, por regra, haja um aumento dos valores de galgamento.

A diferença dos valores dos caudais médios obtidos para cada um dos três casos é bem evidente, apresentando uma variação de 58% e de quase 120% entre o “Caso de Estudo Inicial” e o caso com “Núcleo Impermeável” e o caso com “Núcleo e Manto Impermeável”, respetivamente.

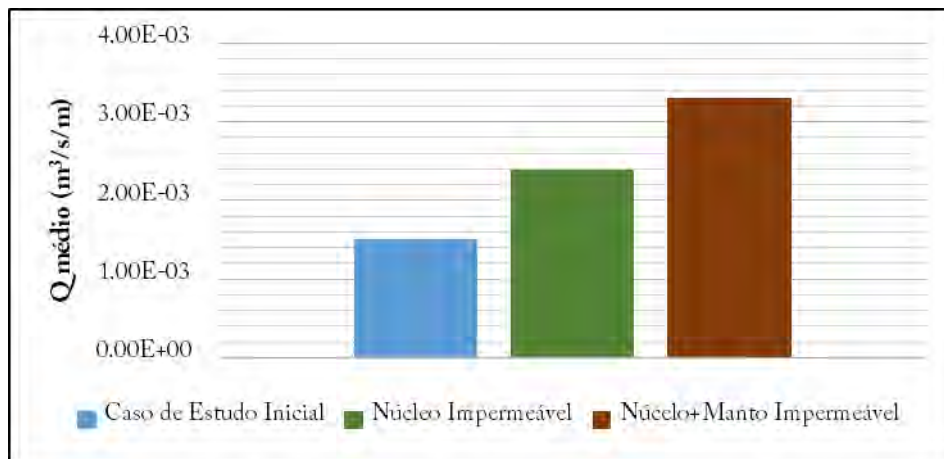


Figura 6.4: Valores de caudal médio, tendo em conta as diferentes modelações.

Tal como nos casos anteriores, realizou-se uma análise estatística ao nível das variações de superfície livre registadas pelas sondas (Figura 6.5) e também do erro relativo (Tabela 6.1), tomando-se o caso de estudo anterior, isto é, com todos os mantos porosos, como referência.

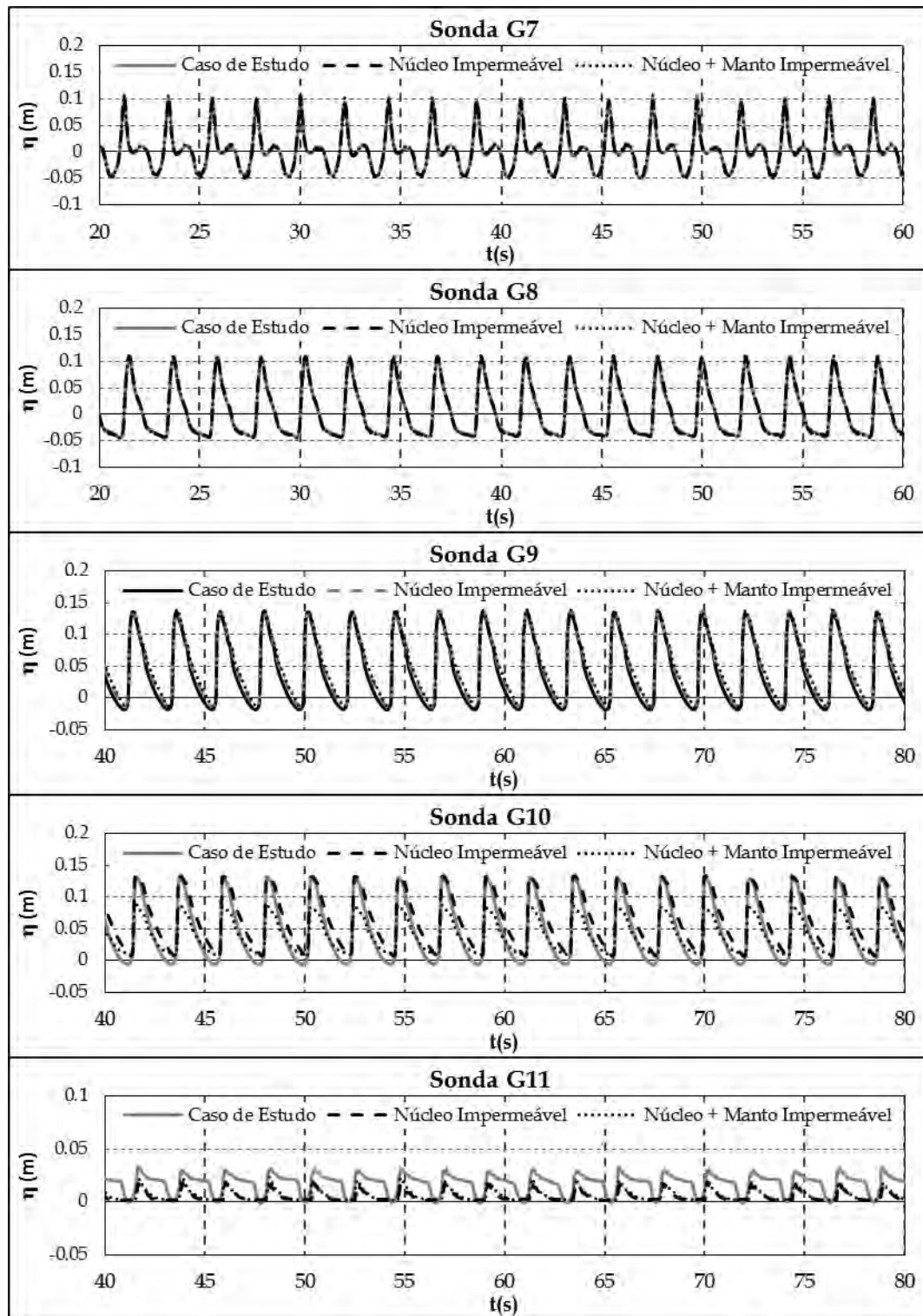


Figura 6.5: Variação da superfície livre registada nas sondas G7 a G11 para os diferentes casos simulados.

Da análise dos valores da Tabela 6.1 e da Figura 6.5, pode constatar-se que a diferença é maior na última sonda (G11), que está colocada no coroamento. Tanto na série temporal da elevação da

superfície livre, bem como na análise estatística e nos erros relativos das alturas médias, a diferença é bem evidente.

Tabela 6.1: Análise de erro entre as diferentes configurações da secção do quebra-mar.

Análise do erro						
Análise estatística do erro				Erro relativo		
	Sonda	Bias (m)	Rmse (m)	Ic (-)	Hmedio	Tmedio
Estrutura Base x Estrutura c/ Núcleo Impermeável	G6	6.431E-04	1.032E-03	99.99%	0.3%	0.0%
	G7	3.386E-04	3.670E-03	99.73%	1.3%	2.1%
	G8	8.072E-04	2.478E-03	96.88%	1.0%	0.1%
	G9	6.109E-03	7.616E-03	100%	2.4%	0.0%
	G10	1.733E-02	1.958E-02	95.50%	7.6%	0.0%
	G11	-2.200E-02	1.391E-02	55.66%	48.7%	0.0%
Estrutura Base x Estrutura c/ Núcleo e Manto Secundário Impermeável	G6	5.382E-05	1.258E-03	99.98%	1.1%	0.0%
	G7	-8.998E-05	3.143E-03	98.80%	0.4%	2.3%
	G8	-3.696 E-04	1.845E-03	97.71%	1.4%	0.1%
	G9	8.954E-03	1.122E-02	100.00%	0.7%	0.0%
	G10	-6.930E-03	2.167E-02	91.56%	44.1%	0.0%
	G11	-1.067E-02	1.255E-02	61.18%	40.4%	0.0%

Quando considerado o manto secundário impermeável, pode observar-se que não só a última sonda (G11) apresenta um erro relativo considerável, como também a sonda imediatamente a barlar desta (G10). Como se pode ver, o índice de concordância baixa de valores superiores a 96% para valores da ordem dos 95% e 91% na sonda G10 e para 56% e 61% na sonda G11, para o caso do núcleo impermeável e do núcleo e manto secundário impermeáveis, respetivamente.

Estes valores vão de encontro aos resultados da variação da elevação da superfície livre, ilustrados na Figura 6.5. Até à sonda G9 inclusive, existe uma excelente concordância entre as séries temporais dos três casos. As diferenças surgem quando se entra na zona das sondas G10 e G11, que se encontram acima do nível da água em repouso, concretamente no início da berma e na zona do coroamento da estrutura e que refletem o efeito das ondas quando estas galgam a estrutura,



que é onde há diferenças na geometria e características da estrutura que leva, necessariamente, a diferenças no escoamento.

Assim, no caso da aplicação do modelo SPHyCE, para se obterem as mesmas condições de escoamento na estrutura considerando algum manto impermeável, ter-se-á que alterar as condições de escoamento no manto permeável para que, globalmente, o comportamento da estrutura seja semelhante.

Para ilustrar os resultados obtidos, na Figura 6.6 e Figura 6.7 apresenta-se uma sequência de imagens da propagação de uma onda e respetivo galgamento sobre os dois casos estudados, com núcleo impermeável e com núcleo e manto secundário impermeáveis, respetivamente, e com indicação das velocidades horizontais do escoamento,  $u$ .

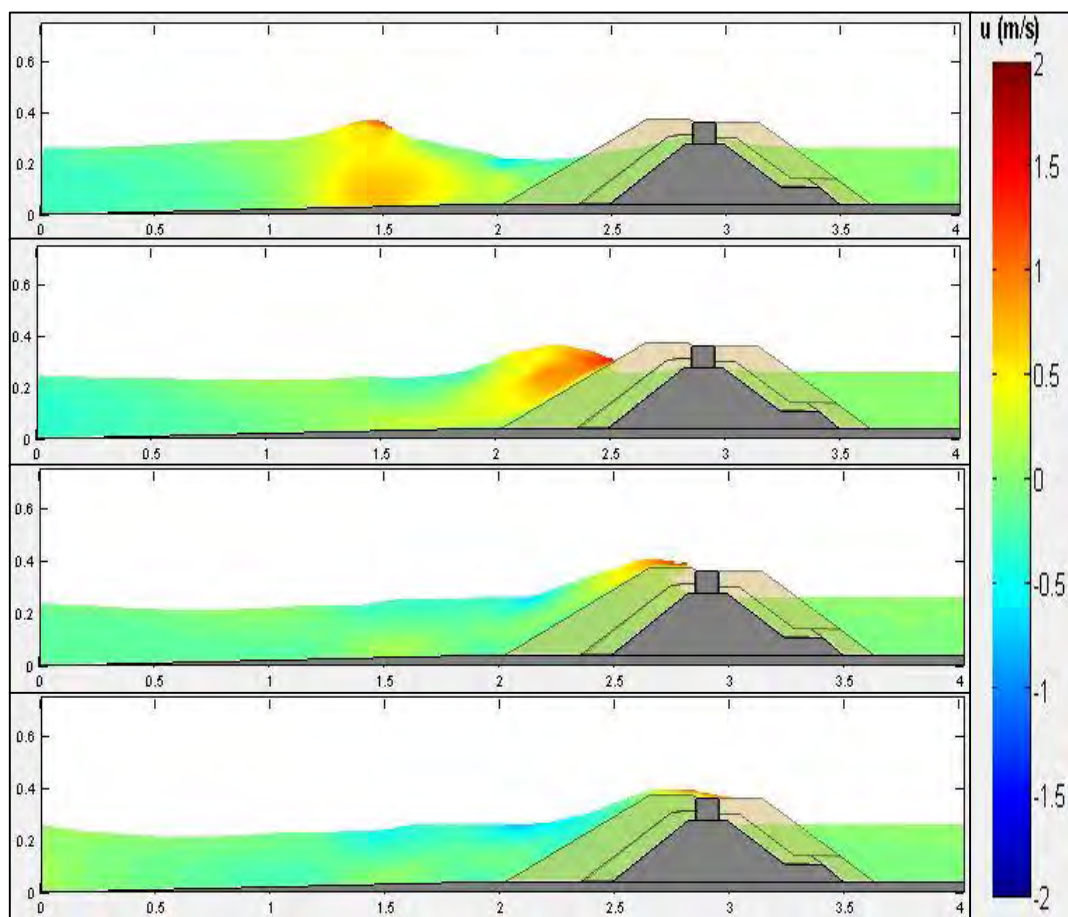


Figura 6.6: Sequência do curso de uma onda e respetivo galgamento sobre o quebra-mar.



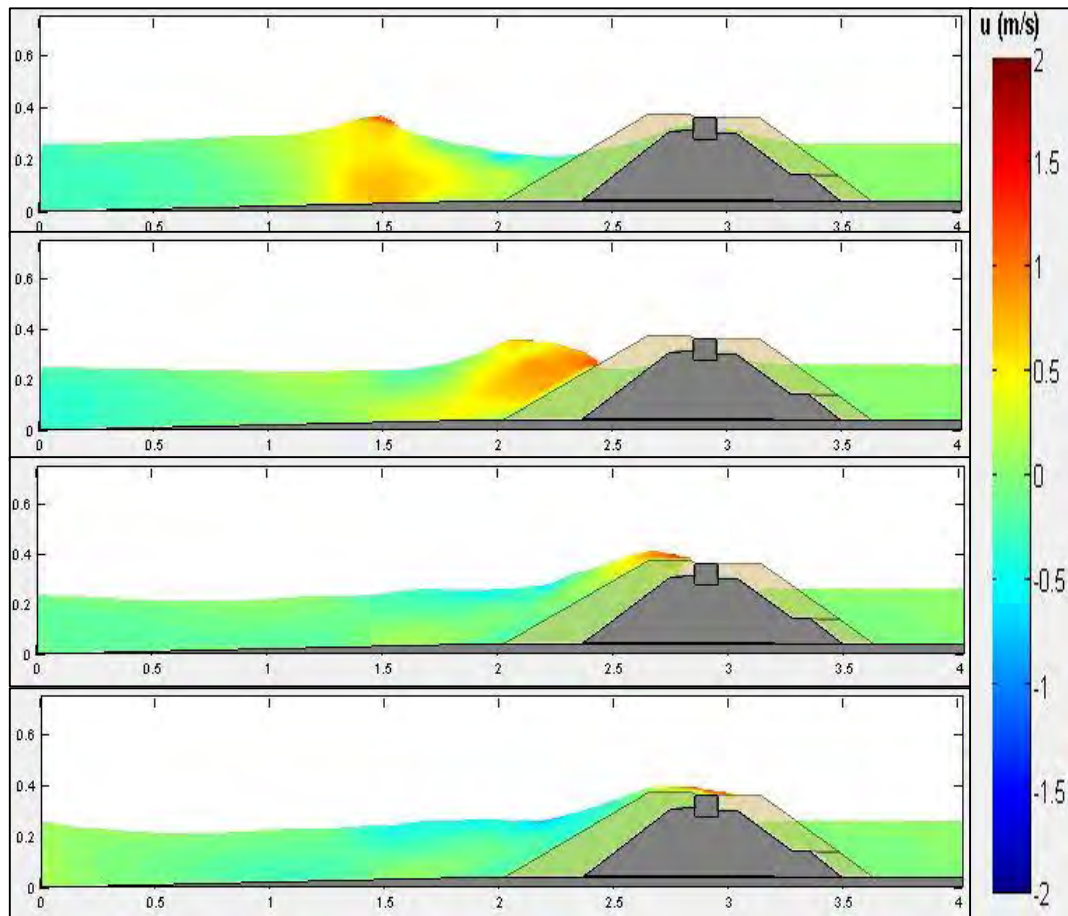


Figura 6.7: Sequência do curso de uma onda e respetivo galgamento sobre o quebra-mar – núcleo e manto impermeáveis.

Apesar de não ser muito perceptível nas figuras, a velocidade do escoamento na zona do coroamento do quebra-mar é superior no caso do núcleo e manto secundário impermeáveis, o que se traduz nas diferenças referidas anteriormente nos valores da variação de elevação da superfície livre e do galgamento.

### 6.3 Manto principal

Num quebra-mar de talude, os valores dos parâmetros que caracterizam os diferentes meios porosos existentes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $n$  e  $D_{50}$ ) no modelo IH2VOF tem influência no modo como a estrutura se comporta perante a ação da onda e, particularmente, no caso do fenómeno que é alvo de estudo nesta dissertação, no galgamento.

Assim, para verificar como se altera o galgamento alterando uma das características do manto principal, optou-se por analisar os efeitos da alteração do coeficiente de atrito não linear, ou seja, o parâmetro  $\beta$ .

Para a escolha dos valores aplicados a  $\beta$  teve-se em consideração as recomendações feitas pela literatura [20], variando o seu valor entre 0.8 e 1.1.

Efetuarão-se cálculos para três valores de  $\beta$  do manto principal, mantendo-se as características dos restantes meios porosos constantes (ver na Tabela 5.6). Na Tabela 6.2 apresentam-se as características dos parâmetros utilizados no manto principal. Compararam-se, posteriormente, os resultados obtidos com os do modelo físico no que se refere ao galgamento e à elevação da superfície livre nas sondas G7 a G11.

Tabela 6.2: Valores dos parâmetros dos meios porosos considerados.

		$n$	$\alpha$	$\beta$
<b>Análise 1</b>	<b>Manto Principal</b>	0.35	200	0.7
	<b>Manto Secundário</b>	0.35	200	1.1
	<b>Manto Secundário interior</b>	0.35	200	1.1
	<b>TOT</b>	0.3	200	0.8
<b>Análise 2</b>	<b>Manto Principal</b>	0.35	200	0.8
	<b>Manto Secundário</b>	0.35	200	1.1
	<b>Manto Secundário interior</b>	0.35	200	1.1
	<b>TOT</b>	0.3	200	0.8
<b>Análise 3</b>	<b>Manto Principal</b>	0.35	200	0.9
	<b>Manto Secundário</b>	0.35	200	1.1
	<b>Manto Secundário interior</b>	0.35	200	1.1
	<b>TOT</b>	0.3	200	0.8

No que diz respeito à onda incidente, considerou-se uma altura de onda ( $H$ ) de 0.118m de altura com um período de propagação ( $T$ ) de 2.191s, que corresponde ao valor que foi obtido no ensaio com modelo físico, na zona de geração do canal (total) sem estrutura.

Assim sendo, em primeiro lugar, gerou-se com o modelo numérico IH-2VOF esta onda, considerando o canal total sem a presença da estrutura. Através da análise da variação de superfície

livre ( $\eta$ ), procedeu-se à reconstrução da onda e, posteriormente, através do método de acoplamento aplicado na secção correspondente à sonda G5, obtiveram-se as características da onda a ser gerada no canal parcial (estático), já com estrutura. A onda reconstruída foi tido como um dado de entrada para o canal parcial (estático), ou seja, na secção de acoplamento, e apresenta uma altura  $H$  de 0.13m assim como um período de  $T=2.191s$ .

Obtidos os caudais médios de galgamento para cada um dos três casos em análise, compararam-se os valores resultantes com o valor obtido nos ensaios em modelo físico, Figura 6.8. Os valores variaram entre  $1.24 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  para  $\beta=0.7$  e  $0.9$  e  $1.28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  para  $\beta=0.8$ , enquanto em modelo físico o valor obtido foi de  $1.03 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . O erro relativo é inferior a 25%, que é um erro relativamente baixo tendo em conta as incertezas na medição do caudal médio galgado.

Esta diferença deve-se ao facto da variação do valor de  $\beta$  estar relacionada com variações na reflexão do manto e, dependendo da fase da reflexão, esta leva a um aumento ou diminuição da altura de onda junto à obra, o que pode levar a uma alteração do galgamento resultante. Assim, a um aumento de  $\beta$  não se pode associar um aumento ou diminuição linear do caudal médio galgado resultante.

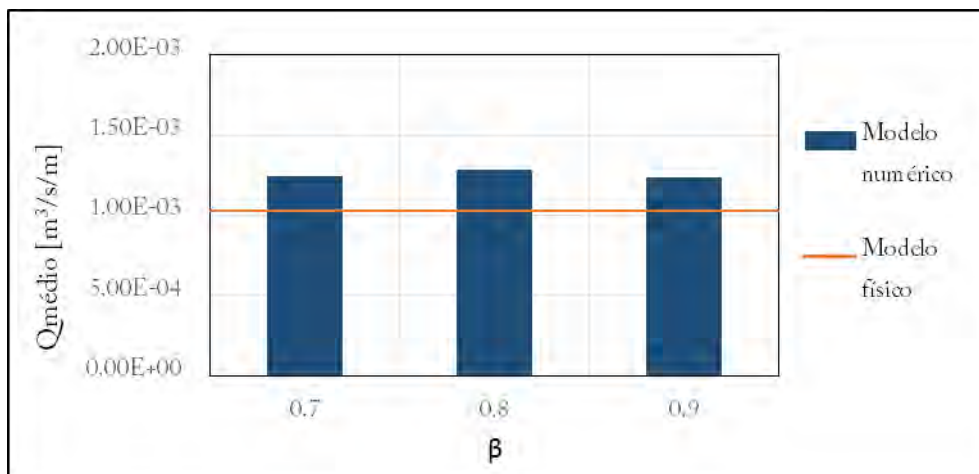


Figura 6.8: Caudal médio obtido para diferentes valores de  $\beta$  em modelo numérico e o obtido em modelo físico.

Da comparação da variação da elevação da superfície livre no tempo entre as diferentes configurações (Figura 6.9), observa-se que a diferença é pequena. Mesmo na sonda G11, que se encontra na posição onde é feita a análise do caudal médio de galgamento, a diferença é pequena.

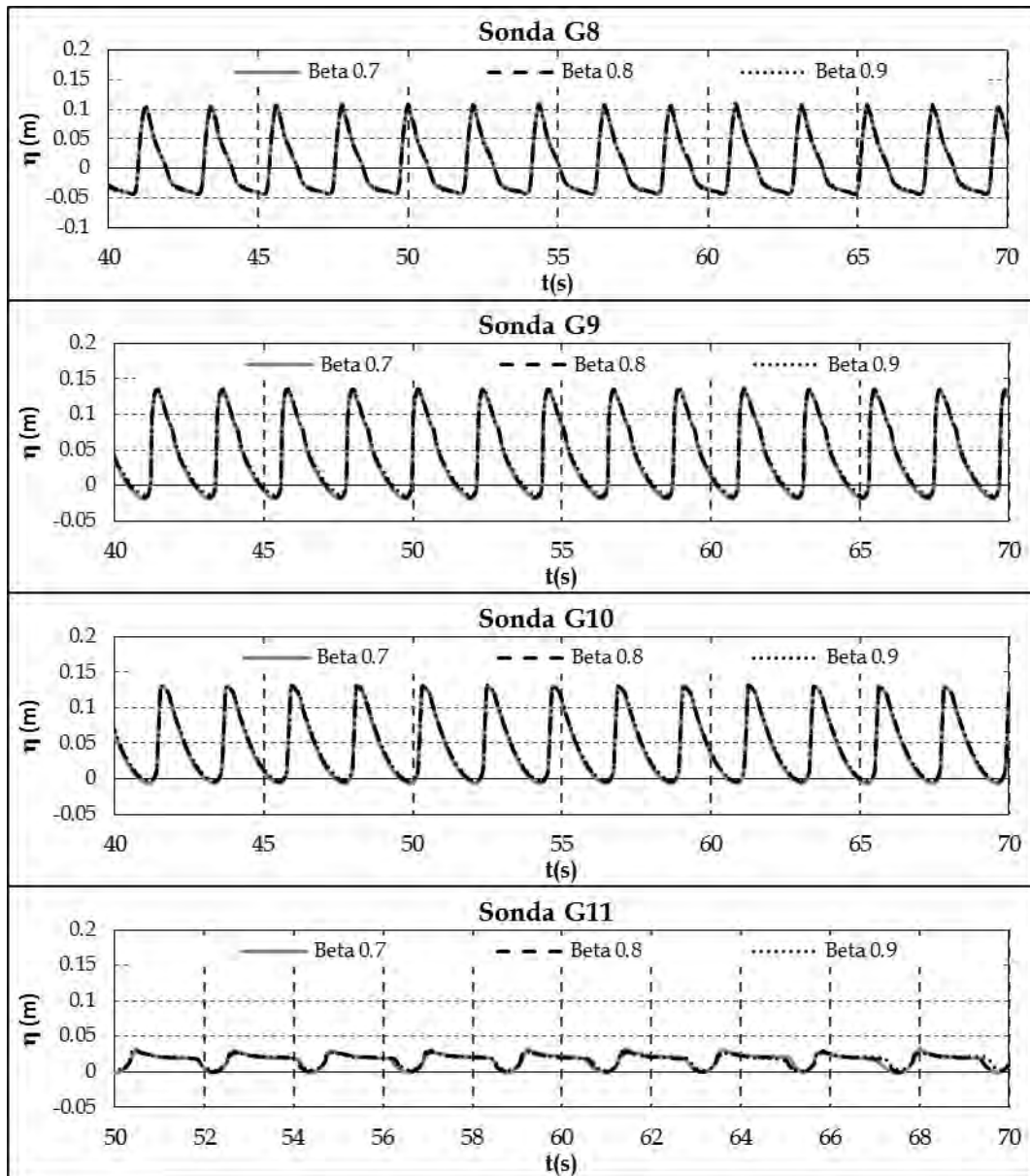


Figura 6.9: Variação da superfície livre registada nas sondas G8 a G11 para as diferentes configurações do parâmetro  $\beta$ .

Para comparar as diferenças das alturas de onda registada pelas sondas em modelo numérico e em modelo físico, analisou-se o erro das alturas de onda média entre cada um dos três casos e o modelo físico, por forma ver a diferença existente ao longo do canal (Tabela 6.3).

Tabela 6.3: Erro relativo de  $H_{\text{médio}}$  entre modelo físico e modelos numéricos.

Hmédio Físico vs Hmédio Numérico			
Sonda	$\beta=0.7$	$\beta=0.8$	$\beta=0.9$
G6	20.4%	20.3%	20.1%
G7	36.9%	36.5%	35.9%
G8	16.5%	17.0%	17.3%
G9	4.1%	2.4%	1.0%
G10	35.2%	32.9%	31.5%
G11	34.9%	41.9%	45%

Da análise dos valores resultantes, verifica-se que as diferenças entre o modelo físico e o modelo numérico variam entre 4%, na sonda G9, a valores compreendidos entre 16% e 45%, nas restantes sondas. No entanto, as diferenças dos erros relativos para os diferentes valores de  $\beta$  testados são reduzidas, inferiores a 10%.

Os valores dos parâmetros aqui utilizados resultam de calibrações efetuadas anteriormente, [18], para todas as condições ensaiadas. Tal como se verificou nessa dissertação, existem outros parâmetros cujo efeito na variação do galgamento é superior, como a porosidade ( $n$ ), cuja alteração poderia ser efetuada no caso da aplicação do modelo SPHyCE, para compensar as diferenças na porosidade dos mantos.



## CAPÍTULO VII

### Conclusões e desenvolvimentos futuros

O principal objetivo desta dissertação é o estudo do fenómeno do galgamento em estruturas marítimas, nomeadamente no Quebra-mar Oeste do Porto de Pesca de Albufeira, através da realização de ensaios em modelo numérico (IH-2VOF). Este quebra-mar tinha vindo a ser objeto de estudo no âmbito do projeto de investigação “SPACE – Desenvolvimento e validação de um modelo Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) para aplicações a estruturas costeiras”, que incluiu, campanhas de campo, ensaios em modelo físico e modelação numérica.

No âmbito da modelação numérica, tinha-se como objetivo o estudo da influência do acoplamento entre malhas de diferentes dimensões de um mesmo modelo, cuja função é reduzir o tempo computacional sem diminuir a precisão dos resultados, e da forma de geração de ondas, batedor dinâmico ou estático, nos resultados do modelo, concretamente na superfície livre ao longo do canal e no galgamento.

A técnica de acoplamento permite estudar zonas relativamente extensas, do largo até às estruturas costeiras, utilizando malhas de resolução distinta, cada um delas dedicada à modelação de uma zona específica do domínio de cálculo, em função das suas características, com o intuito de reduzir o tempo de cálculo computacional e garantindo uma maior precisão dos resultados. Neste trabalho quantificou-se o erro cometido aquando da utilização desta técnica. Para tal, optou-se pela construção de três geometrias do canal de modo a perceber as diferenças que surgiam com a modelação de vários elementos, alteração da batimetria de fundo e colocação da estrutura, indo desde um canal de fundo plano até à configuração final do caso de estudo, com batimetria modelada por uma rampa de declive constante e um quebra-mar de talude.

Na secção de acoplamento a agitação pode ser gerada quer por um batedor dinâmico, semelhante aos existentes nos canais de laboratório, quer por um batedor estático. As diferenças introduzidas pela forma de geração de ondas podem ser significativas e foram analisadas e quantificadas. Como não foi possível introduzir uma série temporal na simulação do batedor dinâmico, para este tipo de batedor, devido a um erro do modelo, considerou-se agitação regular.

Foi considerada a mesma condição agitação para os três casos e dois tipos de batedor, com uma altura de onda e um período de 0.1167m e 2.191s (valores à escala 1:30), respetivamente.

Os resultados obtidos nos vários parâmetros analisados permitiram verificar a influência da batimetria e da estrutura no erro associado ao acoplamento de malhas. Na comparação dos resultados entre o Canal Total e os canais parciais notaram-se maiores diferenças de valores quando utilizado o batedor dinâmico. A diferença desses resultados ficou comprovada através da análise do erro e verificou-se que o erro é agravado a partir do momento em que se introduz um fundo inclinado e a estrutura.

Com estes resultados, pode-se concluir que o método de acoplamento e a sua aplicação no modelo numérico IH-2VOF pode ser vantajoso para os casos em que a geração das condições de agitação seja feita através de batedor estático, já que permite obter resultados com boa precisão. A opção pelo batedor tipo pistão (dinâmico) com a introdução da agitação regular, neste caso, não se revelou preciso quando se tem uma batimetria de fundo e/ou uma estrutura marítima do tipo do quebra-mar de talude.

Por último, no que diz respeito às alterações dos parâmetros característicos dos meios porosos, quer ao nível da porosidade (ou impermeabilidade), quer ao nível da variação do coeficiente de atrito não linear, analisaram-se as consequências ao nível do galgamento e da elevação da superfície livre ao longo do canal.

No caso em que se consideraram alguns meios impermeáveis, concretamente o manto secundário e o núcleo, tal como se sabia à partida, o volume de caudal galgado obtido aumentou consideravelmente. Assim, para se obterem as mesmas condições de escoamento na estrutura considerando algum manto impermeável, ter-se-á que alterar as condições de escoamento no manto permeável para que, globalmente, o comportamento da estrutura seja semelhante.

Assim, verificou-se como se alterava o galgamento quando se alterava uma das características do manto principal: o coeficiente de atrito não linear. Os resultados obtidos mostram que uma pequena variação no valor deste parâmetro, de 0.1, pode levar a uma variação da ordem dos 25% no caudal médio galgado.

Em termos futuros, seria interessante realizar um estudo semelhante aplicando um batedor tipo pistão (dinâmico) de forma a compara-lo com os ensaios em modelo físico, onde a geração é feita com este tipo de batedor. Através de algumas melhorias que se estão a fazer ao nível do modelo IH-2VOF, será possível a realização do estudo com este tipo de batedor.



# BIBLIOGRAFIA

---

- [1] D. Vera-Cruz, “Generalidades sobre Quebra-Mares Tradicionais. Particularidades sobre Quebra-Mares de Talude,” *Memória n.º 338, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, 1969.
- [2] C. Pita, Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-Mares de Talude. Memória nº 670, LNEC, Lisboa, 1986.
- [3] J. J. M. Pérez, Ondas regulares y su aplicación a la Ingeniería de Costas, Publicação realizada pela Universidad de Cádiz, 2011.
- [4] USACE, *Coastal Engineering Manual*, vol. Part VI, Washington, D.C., 2006.
- [5] R. Taborda, J. M. Alveirinho Dias e C. Gama, “Sobreelevação do nível do mar de origem meteorológica ("Storm Surge"), em Portugal Continental,” 1992.
- [6] IH Cantábria, Instituto de Hidráulica Ambiental, IH-2VOF Course (November 20th - November 21st), U. d. Cantábria, Ed., 2012.
- [7] J. L. Lara, N. Garcia e I. J. Lousada, “RANS modeling applied to random wave interaction with submerged permeable structures,” *Coastal Engineering, Vol 53 (5-6)*, pp. 395-417, 2006.
- [8] T. J. Hsu, T. Sakakiyama e P. L. F. Liu, “A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater,” *Coastal Engineering*, pp. 25-50, 2002.
- [9] M. R. A. Van Gent, “The modeling of wave action on and in coastal structures,” *Coastal Engineering*, pp. 311-339, 2014.
- [10] C. W. Hirt e B. D. Nichols, “Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries,” pp. 201-225, 1981.

- [11] J. L. Lara, M. D. Jesus, I. J. Losada, P. Higuera, A. E. Ruju e M. Maza, “Realistic wave generation using Navier-Stokes models,” *Fifth International Conference on Advanced Computational Fifth International Conference on Advanced Computational*, 2011.
- [12] R. G. García, “Análisis de la funcionalidad y estabilidad de obras marítimas mediante un modelo numérico basado en las ecuaciones de Reynolds,” 2007.
- [13] E. Didier, D. Neves, P. Teixeira, J. Dias e M. G. Neves, “SPH numerical and physical modeling of wave overtopping a porous breakwater,” Porto - Portugal, 2014.
- [14] R. P. Capitão, Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), 2004.
- [15] C. A. R. M. Pita, Dimensionamento de quebra-mares e dos seus elementos constitutivos. Relatório 126/85, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1984.
- [16] A. Kortenhaus, J. Van der Meer, J. Geeraerts, J. Van der Meer, H. Burcharth, T. Pullen, D. Ingram e P. Troch, “CLASH: D40 Report on Conclusions of Scale Effects,” Aalborg Universitetsforlag, Aalborg, 2005.
- [17] H. P. Soares, “Estudo do quebra-mar do Porto de Pesca de Albufeira: Modelação numérica do galgamento usando um modelo SPH,” 2013.
- [18] D. R. C. B. Neves, E. Didier e M. G. Neves, “Aplicação do modelo SPHyCE a estruturas porosas: Quebra-mar Oeste do porto de Albufeira,” Lisboa, 10 e 11 de outubro de 2013, PIANC Portugal, 2013.
- [19] D. Newland, An introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis, Golborne: Longman, 1975.
- [20] N. Garcia, J. L. Lara e I. J. Losada, “2-D Numerical Analysis of Near-field Flow at Low-crested Permeable Breakwaters,” em *Costal Engineering*, 2004, pp. 991-1020.
- [21] T. M. d. S. Patrício, “Modelação numérica do galgamento de quebra-mares de talude,” 2012.
- [22] J. E. P. Lopes, “Estudo de escoamentos de ondas e correntes: Aplicação do modelo IH-2VOF,” 2012.

- [23] S. F. d. Brito, “Estudo do galgamento em estruturas marítimas,” 2007.
- [24] LNEC, “Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Departamento de Hidraulica e Ambiente,” 2014. [Online]. Available: [http://www.lnec.pt/organizacao/dha/npe/estudos\\_id/SPACE](http://www.lnec.pt/organizacao/dha/npe/estudos_id/SPACE). [Acedido em Setembro 2014].
- [25] CIMA - Centro de Investigação Marinha e Ambiental, 2014. [Online]. Available: <http://www.cima.ualg.pt/cimaualg/>. [Acedido em Julho 2014].
- [26] DELTARES, “Overtopping Neural Network,” [Online]. Available: <http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx>. [Acedido em 2014].
- [27] Relvas, P. - FCT, UAlg, *Ondas de superfície e Agitação marítima*.
- [28] T. Pullen, N. W. H. Allop, T. Bruce, A. Kortenhaus, H. Schuttrumpf e J. Van der Meer, EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual, Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, and Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE, 2007.
- [29] E. Rodrigues, “Galgamento de Estruturas Marítimas: Comparação de Ferramentas de Cálculo,” 2011.